

OLLI KEROKOSKI
TOMMI RANTALA
ARTO KÖLIÖ
ANTTI NURMIKOLU

Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit

RATAPÖLKYN MEKAANISEN TOIMINNAN JA RAPAUTUMISEN KOKEELLINEN JA LASKENNALLINEN ARVIOINTI



Olli Kerokoski, Tommi Rantala,
Arto Köliö, Antti Nurmikolu

Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit

Ratapölkyn mekaanisen toiminnan ja rapautumisen
kokeellinen ja laskennallinen arviointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2013

Liikennevirasto
Helsinki 2013

Kannen kuva: Tommi Rantala

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-302-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Olli Kerokoski, Tommi Rantala, Arto Köliö, Antti Nurmikolu: Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2013. 248 sivua ja 5 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-302-7.

Avainsanat: rata, betoninen ratapölkky, kuormituskestävyys, kenttäkokeet, rakennelaskelmat, rapautuminen

Tiivistelmä

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on vuosina 2009 - 2012 tehty laaja-alaista ratarakenteiden tutkimustyötä. Tutkimusohjelman nimenä on ollut Elinkaaritehokas rata, TERa. Tutkimusalueen 2 ”Betoniratapölkkyjen vaurioitumismekanismit” päätavoitteena oli saavuttaa käsitys betoniratapölkkyjen vaurioitumisen kannalta määräävistä tekijöistä. Tämä kaksiosaisen julkaisusarjan osa 2 sisältää työn kokeellisen ja laskennallisen osuuden.

Työhön kuuluvat Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa tehty kokeellinen tutkimus, kenttäkokeet ja näiden perusteella tehdyt johtopäätökset. Laskennallisessa tutkimuksessa keskitytään suomalaisten betoniratapölkkyjen kestävyyslaskelmiin. Päähuomio on kiinnitetty yksiosaisen betoniratapölkkyjen toimintaan osana raiderakennetta, kestävyys- ja mahdollisten vaurioiden aiheuttajiin.

Kokeellisessa tutkimuksessa tehtiin kuormituskokeita muun muassa standardiin SFS-EN 13230 pohjautuen. Kuormituskokeina olivat staattinen kuormituskoe ratapölkyn päälle ja keskiosalle sekä dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn päälle ja keskiosalle. Kuormituskokeita tehtiin käytöstä poistetuille ja käyttämättömille ratapölkkyille. Käytöstä poistettuja ratapölkkyjä oli kolmea eri tyyppiä: B63, B75 ja BV75. Käyttämättömät ratapölkkyt olivat nykyään Suomen rataverkolle hankittavia tyyppinä B97 ja BP99.

Väsytytkuormituskokeissa kuormitettiin käyttämättömiä B97 ja BP99 ratapölkkyjä. Kuormituskokeiden tarkoituksena oli selvittää ratapölkkyjen väsymisominaisuuksia ja väsymisen vaikutusta ratapölkyn jäykkyyteen. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin halkeaman merkitystä. Ratapölkyn yhteistoimintaa ratapenkereen kanssa tarkasteltiin kuormittamalla tiivistettyjen maakerosten varaan perustettuja uusia pölkkyjä ja prototyyppipölkkyjä pitkäaikaisilla toistokuormituskokeilla. Rataosalta Kontiomäki-Vartius poistetuille BV69- ja B75-ratapölkkyille tehtiin staattisia kuormituskokeita. Ratapölkkyjen betonin rapautumista tutkittiin laajan koeohjelman mukaisesti.

Kenttäkokeita tehtiin raiteenvastusmittausten muodossa ratapihalla Mellilässä ja ratapölkyn rasiustason tarkasteluina radoilla eri puolilla Suomea ja eri vuodenaikoina. Radoilla mitattiin ratapölkyn yläpinnan venymien muutoksia ja taipumista junan kuormittaessa raidetta. Venymämittauksien mukaiset pohjapaineet keskittyivät kiskon viereen noin 350 mm matkalle raiteen keskikohdan puolelle. Lisäksi talvella raiteen keskellä oli pohjapaine yli puolta pienempi kuin sulassa penkereessä ja myös ratapölkkyjen taivutusrasitus selvästi pienempi.

Suomessa käytetyt ratapölkkyt voidaan arvioida kuormituskokeista saatujen tulosten perusteella pääsääntöisesti hyväksi. Kuormituskokeissa havaittiin myös käytöstä poistettujen ratapölkkyjen täyttävän yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta uusille ratapölkkyille asetettavat kriteerit, joskin käytön aikana syntyneitä halkeamia esiintyi useissa ratapölkkyissä.

Hyvän kuormituskestävyyden myötä betoniratapölkyn pitkäaikaiskestävyyden kannalta keskeisessä osassa todettiin olevan betonin rapautumattomuudesta huolehtiminen pölkkyjen valmistusprosessissa. Tarkasteltujen betoniratapölkkyjen osalta myös rapautumiskestävyys käyttöolosuhteissa havaittiin kuitenkin pääsääntöisesti varsin hyväksi. Täten asianmukaisesti valmistettujen betoniratapölkkyjen toimivuus ja pitkäaikaiskestävyys radassa voitiin arvioida erittäin hyväksi ja nykyiset käyttöikätaavoitteet ylittäväksi.

Olli Kerokoski, Tommi Rantala, Arto Köliö, Antti Nurmikolu: Betongsliperns strukturella funktion och skademekanismer. Trafikverket, infrastructure och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 37/2013. 248 sidor och 5 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-302-7.

Sammanfattning

På Institutionen för byggnadsteknik vid Tammerfors tekniska universitet har man 2009–2012 utfört ett omfattande forskningsarbete om bankonstruktioner. Forskningsprogrammets namn är Elinkaarihokas rata, TERa ((järnväg med kostnadseffektiv livscykel). Huvudmålet för forskningsområde 2, "Betongsliperns skademekanismer", var att bilda en uppfattning om de faktorer som är av avgörande betydelse i fråga om skador på betongsliprar. Del 2 i denna tvådelade publikationsserie omfattar arbetets empiriska och beräkningsmässiga del.

Arbetet omfattar en empirisk undersökning utförd i Tammerfors tekniska universitets laboratoriehall, fältprover och slutledningarna som dragits utifrån dessa. I den beräkningsmässiga undersökningen ligger fokus på hållbarhetskalkyler av finländska betongsliprar. Undersökningen fokuserar på helgjutna betongsliprars funktion som en del av bankonstruktionen, hållbarhet och eventuella skadeorsaker för sliprarna.

I den empiriska undersökningen utfördes belastningsprov bland annat enligt standarden SFS-EN 13230. Belastningsproven bestod av ett statiskt belastningsprov i ändan och i mitten av slipern samt ett dynamiskt belastningsprov i ändan och i mitten av slipern. Belastningsproven gjordes på avskaffade och oanvända sliprar. Det fanns tre olika typer av avskaffade sliprar: B63, B75 och BV75. De oanvända sliprarna var av typerna B97 och BP99 som nu används i Finlands bannät.

I utmattningsproven belastades oanvända sliprar av typen B97 och BP99. Syftet med belastningsproverna var att utreda sliprarnas utmattningsegenskaper och utmattningens inverkan på sliperns styvhet. Därutöver uppskattade betydelsen av sprickor. Sliperns samverkan med banvallen studerades genom att belasta nya sliprar och sliperprototyper som grundats i packade jordlager genom långvariga upprepade belastningsprover. Statiska belastningsprover gjordes på BV69- och BV75-sliprar som avlägsnats från banavsnittet Kontiomäki–Vartius. Söndervittringen av betongen i sliprarna undersöktes enligt ett omfattande provprogram.

Fältprover gjordes i form av spårnotståndsmätningar på bangården i Mellilä och granskningar av belastningsnivån på sliprar på banor på olika håll i Finland under olika årstider. På banorna uppmättes ändringar i töjningen och böjningar i den övre ytan av slipern när spåret belastades av ett tåg. Bottentrycken enligt töjningsmätningarna koncentrerades bredvid rälsen på en sträcka av cirka 350 mm mot mitten av rälsens mittpunkt. Dessutom var bottentrycket i mitten av rälsen över hälften mindre på vintern än i en ofrusen banvall och även sliprarnas böjningsbelastning var betydligt mindre.

De sliprar som används i Finland kan utifrån resultaten från belastningsproverna uppskattas att i huvudsak vara bra. Vid belastningsproven observerades även att de avskaffade sliprarna förutom vissa enstaka undantag uppfyller de kriterier som uppställs för nya sliprar, även om sprickor som uppkommit under användningen förekom i flera sliprar.

I och med en god belastningstålighet konstaterade man att det för sliprarnas långvariga hållbarhet är viktigt att man vid tillverkningsprocessen sköter om att betongen inte kommer att vittra sönder. I fråga om de granskade betongsliprarna observerade man dock att hållbarheten i fråga om söndervittring i användningsförhållandena i regel var mycket god. Således kunde man uppskatta att funktionen och den långvariga hållbarheten hos betongsliprar som tillverkats på tillbörligt sätt var mycket god och översteg livslängdsmålen.

Olli Kerokoski, Tommi Rantala, Arto Köliö, Antti Nurmikolu: Structural behaviour and failure mechanisms of concrete sleepers. Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 37/2013. 248 pages and 5 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-302-7.

Summary

The Department of Civil Engineering at TUT conducted extensive research on railway track structures in 2009–2012 under the Life Cycle Cost Efficient Track (TERA) research programme. The main goal of Research Area 2, *Failure Mechanisms of Concrete Sleepers*, was to get an understanding of factors crucial to failure of concrete sleepers. Part 2 of this two-part publications series presents the experimental and computational side.

The project includes an experimental study in the Laboratory Hall of TUT, field tests, and conclusions drawn from them. The calculational analysis concentrates on durability of Finnish concrete sleepers. The main focus is on the performance of monoblock concrete sleepers as part of the track structure, their durability and possible causes of damage.

The experimental study involved loading tests based on standards, such as SFS-EN 13230. The loading tests consisted of a static loading test and a dynamic loading test on the end and middle of the sleeper. Loading tests were made on decommissioned and unused sleepers. There were three different types of decommissioned sleepers: B63, B75 and BV75. The unused sleepers were of types B97 and BP99, currently acquired for the Finnish railway network.

Unused B97 and BP99 sleepers were loaded in fatigue loading tests. The purpose of the loading tests was to determine the fatigue properties of sleepers and the effect of fatigue on their stiffness. The significance of fractures was also assessed. The interaction of the sleeper with the embankment was studied by loading new and prototype sleepers founded on compacted soil layers by long-term cyclic loading tests. Static loading tests were made on BV69 and B75 sleepers removed from the Kontiomäki–Vartius rail section. Several concrete sleepers with fractures on the top surface in the middle have been discovered along the Ylivieska–Tuomioja (Vihanti) rail section. These sleepers were subjected to static loads. The weathering of concrete of sleepers was analysed by an extensive set of tests.

Field tests included rail resistance tests at a railway yard in Mellilä and sleeper stress analyses along tracks in various parts of Finland in different seasons. Elongation of the top surfaces of sleepers and bending under train loads were measured along tracks. Soil pressures corresponding to elongation measurements concentrated beside a rail over a distance of about 350 mm between the rails. Moreover, the soil pressure below the centre of the sleepers was less than half in winter than in an unfrozen embankment, and the bending stress of the sleepers was also clearly lower. On the basis of the field measurements and 2D FEM calculations, a calculation method and subgrade reaction distributions are presented for the design of new sleepers.

In the light of the results of the loading tests, the sleepers used in Finland can be considered good for the most part. The loading tests also revealed that, save for a few exceptions, decommissioned sleepers meet the criteria set for new sleepers, albeit fractures having originated during their service life appeared in many sleepers.

Because of their high load-bearing capacity, ensuring the concrete's resistance to weathering during the manufacturing process was found vital in terms of the long-term durability of sleepers. However, most of the studied concrete sleepers also proved to have rather high weathering resistance. Thus, the performance and long-term durability of properly manufactured concrete sleepers could be rated very good and above present service life targets.

Esipuhe

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksessa on Liikenneviraston toimeksiannosta vuodesta 2009 lähtien ollut käynnissä ratarakenteen toimintaa käsittelevä tutkimusohjelma, Elinkaaritehokas rata (TERa). Betonisia ratapölkkyjä koskeva osuus, tutkimusalue 2, on Liikenneviraston ja TTY:n tutkimussopimuksessa otsikoitu ”Betoniratapölkkyjen vaurioitumismekanismit”. Tutkimushankkeen sisältö ja tulokset julkaistaan kahdessa osassa: osa 1 sisältää kirjallisuustutkimus- ja haastatteluosuudet ja tämä 2-osa ratapölkkyjen kokeellisen ja laskennallisen tutkimuksen osuudet.

Julkaisun ovat TTY:n Rakennustekniikan laitoksella kirjoittaneet dipl.ins. Tommi Rantala, tekn. toht. Olli Kerokoski ja tekn. toht. Antti Nurmikolu. Julkaisun rapautumistutkimuksia käsittelevän osuuden kirjoittamiseen ovat osallistuneet dipl.ins. Arto Köliö ja tekn. toht. Jukka Lahdensivu. Tutkimusta ovat ohjanneet dipl.ins. Tuomo Viitala ja dipl.ins. Ville-Pekka Lilja Liikennevirastosta.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto
Infra- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	10
1 JOHDANTO	12
2 BETONIRATAPÖLKKYJEN KUORMITUSKOKEET LABORATORIOSSA	14
2.1 Koeohjelma	14
2.1.1 Yleiskuvaus.....	14
2.1.2 Kuormituslaitteisto	16
2.1.3 Mittalaitteet kuormituskokeissa.....	18
2.2 Kuormien valintaperusteet	24
2.2.1 SFS-EN 13230-2:n mukaiset kokeet	24
2.2.2 Väsytskuormituskokeet.....	28
2.3 Koekuormitettujen ratapölkkyjen ominaisuudet.....	29
2.3.1 Käyttämättömät ratapölkkyt staattisissa ja dynaamisissa kokeissa.....	29
2.3.2 Käytetyt ratapölkkyt	30
2.3.3 Vihannin raiteessa haljenneet pölkkyt	32
2.3.4 Väsytskuormituskokeiden pölkkyt	33
2.3.5 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt	33
2.3.6 Ratapölkkyjen halkeilurajatila ja murtorajatila	34
2.4 Koejärjestelyt	38
2.4.1 Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe.....	38
2.4.2 Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe.....	39
2.4.3 Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe.....	40
2.4.4 Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe.....	42
2.4.5 Vihannin raiteessa halkeilleet ratapölkkyt	42
2.4.6 Väsytskuormituskokeet.....	42
2.4.7 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt	43
2.5 Betoniratapölkyn pään kestävyys.....	43
2.5.1 Staattinen kuormituskoe	43
2.5.2 Dynaaminen kuormituskoe	47
2.5.3 Väsytskuormituskokeet.....	49
2.5.4 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt	54
2.5.5 Vertailulaskelmat	56
2.6 Betoniratapölkyn keskiosan kestävyys	59
2.6.1 Staattinen kuormituskoe	59
2.6.2 Dynaaminen kuormituskoe	63
2.6.3 Väsytskuormituskokeet.....	65
2.6.4 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt	68
2.6.5 Vihannin raiteessa halkeilleet ratapölkkyt	70
2.6.6 Vertailulaskelmat	73
2.7 Yhteenveto.....	75
2.7.1 Pölkyn pään kuormituskäyttäytyminen	75
2.7.2 Pölkyn keskiosan kuormituskäyttäytyminen	77
3 RATAPÖLKYN TOIMINTA RADASSA	79
3.1 Raiteen pituus- ja poikittaissuuntaisen vastuksen määrittäminen	79
3.1.1 Koejärjestelyt Mellilän ratapihalla.....	79
3.1.2 Pituussuuntaisten kuormitusten mittaustulokset	85
3.1.3 Poikittaissuuntaisten kuormitusten mittaustulokset.....	88
3.1.4 Laskennallinen vertailu ja päätelmät	92

3.2	Betoniratapölkkyjen rasitukset erilaisilla tukikerroksilla	95
3.2.1	Koejärjestelyt ja testatut ratapölkkyt	95
3.2.2	Mittaustulokset	100
3.2.3	Tulosten arviointi ja päätelmät	112
3.2.4	Kuormitustestaus erilaisilla tukikerroksilla: laskennallinen vertailu ..	117
3.3	Valtimon koekohde vähäliikenteisten ratojen kunnostamiseksi	121
3.3.1	Koejärjestelyt	122
3.3.2	Mitatut venymät sepelitukikerros.....	126
3.3.3	Mitatut venymät soratukikerros.....	131
3.3.4	Kiskojatkokset.....	136
3.3.5	Yhteenveto.....	140
3.4	Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen rasitusten mittaus.....	141
3.4.1	Koekohteet, koeohjelma ja mittausten aikaiset havainnot.....	141
3.4.2	Mittaustulokset, huhtikuu 2011	146
3.4.3	Mittaustulokset, syyskuu 2011	152
3.4.4	Mittaustulokset, helmi-maaliskuu 2012	159
3.4.5	Yhteenveto kolmen vuodenajan mittauksista	166
3.4.6	Tulosten laskennallinen vertailu	169
3.5	Ratapölkyn kuormitus, tuenta ja rasitukset tukikerroksen seulontavaiheessa	173
4	RATAPÖLKYN RASITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN UUSIEN PÖLKKYJEN SUUNNITTELUA VARTEN	175
4.1	Ratapölkyn rasitukset eri pohjapainejakautumilla.....	175
4.2	Ratapölkkyjen laskenta alustalukutarkastelun avulla	179
4.2.1	Laskennan periaatteet, käytetyt alustalukujakaumat ja	179
4.2.2	Tulokset.....	181
4.2.3	Kiskon kohdan kallistuminen ja raideleveyden muutokset	190
4.2.4	Mittausten mukaiset ratapölkyn tuennat.....	191
4.2.5	Yhteenveto.....	192
4.3	Ehdotus uusien ratapölkkyjen suunnitteluohjeeksi alustalukutarkastelun avulla	193
4.3.1	Laskennan periaatteet	193
4.3.2	Tarkasteltavat alustalukujakaumat.....	194
5	BETONIN RAPAUTUMISEN TESTAAMINEN	196
5.1	Yleiskuvaus	196
5.2	Tavoitteet ja tutkittavien ratapölkkyjen valintaperusteet.....	196
5.3	Koeohjelma ja koejärjestelyt	199
5.3.1	Yleistä	199
5.3.2	Betoninäytteet ja niistä määritetyt mitat ja betonin tiheys	199
5.3.3	Silmämääräinen tarkastelu.....	201
5.3.4	Suojahuokossuhteen ja kapillaarikyllästyspitoisuuden määrittäminen.....	201
5.3.5	Karbonatisoitumissyvyyden mittaus	202
5.3.6	Jäädytys-sulatuskoe (SFS-5447).....	202
5.3.7	Betonin rapautumisen tutkiminen ultraäänimittauksilla.....	204
5.3.8	Halkaisuvetolujuuden testaus.....	206
5.3.9	Pakkassuolakoe	207
5.3.10	Muut tarkastelut	209
5.4	Tulokset	210
5.4.1	Silmämääräinen tarkastelu.....	210

5.4.2	Suojahuokossuhde ja kapillaarikyllästyspitoisuus.....	211
5.4.3	Karbonatisoitumissyvyys.....	212
5.4.4	Ohuthietarkastelut.....	213
5.4.5	Jäädytys-sulatuskoe	215
5.4.6	Pakkassuolakokeet 2010.....	224
5.4.7	Pakkassuolakokeet 2012.....	226
5.5	Yhteenveto tuloksista	230
6	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	234
6.1	Ratapölkkyjen kuormituskäyttäytyminen laboratoriossa.....	234
6.1.1	Kuormituskoeohjelma	234
6.1.2	Halkeamat ja niiden merkitys	234
6.1.3	Väsytyt.....	234
6.1.4	Kuormituskoetulosten yleistys	235
6.2	Raiteen pituus- ja poikittaissuuntainen vastus	235
6.3	Ratapölkkyjen tukireaktiot ja rasitustasot raiteessa	236
6.3.1	Mittausohjelma	236
6.3.2	Mittaustuloksista määritetty pölkkyjen radassa kohtaama taivutusrasitus.....	236
6.3.3	Vuodenaikaisvaihtelu pölkyn rasitustasoissa.....	237
6.3.4	Tukikerroksen rooli pölkkyjen rasitustasoihin.....	237
6.3.5	Laskelmin arvioitu pölkkyjen radassa kohtaama taivutusrasitus	238
6.3.6	Vaatimusten ja koekuormitusrasituksen ristiriidat	239
6.3.7	Vaatimusten ja koekuormitusrasituksen vertailu kentällä havaittuun taivutusrasitukseen	240
6.3.8	Ratapölkkyjen tukireaktiotapaukset uusien pölkkyjen suunnittelua varten.....	241
6.4	Betonin rapautuminen.....	242
7	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	245
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	247
	LIITTEET	
Liite 1	Esimerkkejä ratapölkkyjen rakenteellisesta mitoituksista eri alustalukujakautumilla	
Liite 2	Oletetun alustalukujakauman ja betonin vetolujuuden mukainen akselipaino	
Liite 3	Raiteen ja ratapenkereen 2D-FEM-laskenta	
Liite 4	Valtimon koekohteen tukikerrosnäytteiden rakeisuuskäyrät	
Liite 5	Ohuthienäyteraportit	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

E	Kimmokerroin (kimmomoduuli)
ε	Venymä tai puristuma
$f_{c,cube}$	Betonin puristuslujuus, suomalainen K-lujuus
f_{ck}	Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
f_{ctk}	Betonin vetolujuuden ominaisarvo
f_{sy}	Jännepunoksen myötölujuus
f_{puk}	Jänneteräksen vetolujuus
σ_c	Betonijännitys
M_k	Taivutusmomentti, ominaisarvo
M_r	Taivutusmomentti kiskon kohta
M_c	Taivutusmomentti keskikohta
V	Leikkausvoima
φ_v	Sysäyskerroin
Q_{vk}, q_{vk}	Mitoitustaavion LM71-35 pistekuorma ja metrikuorma
y	Poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus
z	Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarssi
d	Korkeus punosten keskipisteestä poikkileikkauksen ylä- tai alapintaan
p	Pohjapaine [kN/m]
F	Kuormitus
L	Jänneväli
h	Ratapolkyn korkeus
b	Ratapolkyn leveys, yläreuna
a	Ratapolkyn leveys, alareuna
h_{su}	Etäisyys neutraaliakselilta, alareuna
h_{so}	Etäisyys neutraaliakselilta, yläreuna
W_u	Taivutusvastus alareunan suhteen
W_o	Taivutusvastus yläreunan suhteen
I_c	Jähyysmomentti
A	Poikkileikkausala

Julkaisun UIC Code 713 “Desing of monoblock concrete sleepers” merkintöjä:

Q_o	Staattinen akselikuorma [kN]
λ	Sisäinen momenttivarssi [m]
L_p	Etäisyys kiskon lepopinnan keskilinjalta ratapolkyn päähän [m]
L_r	Tukien keskilinjojen väli ratapolkyn pään kuormituskokeissa; 0,6 m, kun $L_p \geq 0,450$ m
L_c	Kiskon lepopintojen keskipisteiden välinen etäisyys; 1,6 m
d	Ratapolkyn korkeus kiskon lepopinnan keskilinjalta [m]
e	Kuorman jakautuman leveys [m] (ks. Kuva 2.15)
P_k	Ratapolkkyyn kohdistuva kuorma
P_d	Ratapolkkyyn kiskon kohdalle kohdistuva mitoituskuorma [kN]
M_{dr+}	Positiivinen mitoitusmomentti kiskon lepopinnan kohdalla [kNm]
M_{dc-}	Negatiivinen mitoitusmomentti ratapolkyn keskellä [kNm]
I_c	Jähyysmomentti ratapolkyn keskellä
I_r	Jähyysmomentti kiskon lepopinnan keskellä
F_{ro}	Ratapolkyn pään vertailukoekuorma [kN]
F_{co}	Ratapolkyn keskiosan vertailukoekuorma [kN]

γ_p	Kerroin kiskonkiinnitysten iskukuormien vaimennuskyvylle.
γ_v	Dynaaminen junan nopeuden mukaan määräytyvä kerroin, jolla huomioidaan radan ja kaluston poikkeavuuksia.
γ_d	Kerroin kuormien jakautumiselle ratapölkkyjen kesken.
γ_r	Kerroin ratapölkyn tukireaktiolle. Kertoimella huomioidaan tuennan vaihteluita.
γ_i	Kerroin dynaamiselle lisälle taivutusmomenttiin.
k_1 ja k_2	Poikkeus- ja onnettomuustilanteiden dynaamiset kuormakertoimet

1 Johdanto

Esijännitetty betoniratapölkky on Suomen rataverkon pääradoilla pääasiallinen ratapölkkytyyppi. Ratapölkky on yksi merkittävimmistä komponenteista radan toiminnan kannalta. Sen tärkeimpiä tehtäviä ovat voimien välittäminen tukikerrokseen, kiskon tukeva kiinnittäminen ja raidelevyden säilyttäminen.

Betoninen ratapölkky on ollut Suomessa käytössä 1960-luvun alkupuolelta asti. Tuolloin pölkky oli jälkijännitetty ja nykyisiä pölkkyjä lyhyempi ja kevyempi. Hyvien kokeusten ja betonipölkyn kilpailukykyisen hinnan myötä betonipölkkyjen tuotantomäärä kasvoi merkittävästi 1990-luvun alussa, jolloin Parma Oy aloitti ratapölkkyjen valmistuksen Forssassa VR:n järjestämän tarjouskilpailun jälkeen. Nykyisin Suomessa valmistetaan betoniratapölkkyjä kahdessa tehtaassa. Parma Oy:n Forssan tehtaalla on ratapölkkyjä valmistettu yhteensä runsaat viisi miljoonaa kappaletta ja Lujabetoni Oy:n Siilinjärven tehtaalla viimeisten 15 vuoden aikana yli kolme miljoonaa kappaletta.

Betoniratapölkkyistä saadut käyttökokemukset ovat pääasiassa hyviä. Useat tekijät kuitenkin vaikuttavat ratapölkylle asetetun käyttöikätaavoitteen saavuttamiseen. Tällä hetkellä ratapölkkyjen vaihtotarvetta arvioidaan usein silmämääräisesti, mikä toki on selkeissä vauriotapauksissa hyvä ja nopea tapa. Monissa tapauksissa on kuitenkin epäselvää, onko ratapölkky todella sellainen, että se ei enää pysty täyttämään sille asetettavia vaatimuksia.

Kaikki nykyaikaisten betoniratapölkkyratojen vauriotapaukset eivät johdu ratapölkkyjen puutteista. Esimerkiksi heikko pohjamaa, puutteellinen kuivatus, vajavainen tuentatila sekä erilaiset kalusto- ja kiskoviat voivat vaurioittaa ratapölkkyjä. Yleisimpiä vauriotyyppejä ovat eri syistä johtuvat halkeamat ja kiskonkiinnitysten irtoaminen. Kemiallisen rapautumisen ja pakkasrapautumisen merkitys on pienentynyt merkittävästi tiukentuneiden vaatimusten ja uusien ratapölkky mallien markkinoille tulon myötä. Yli 20 vuoden käyttökokemukset uuden mallisista ratapölkkyistä eivät ole juurikaan antaneet merkkejä betonin rapautumisesta. Kysymykseksi onkin muodostunut se, mitkä tekijät vaikuttavat ratapölkkyjen vaurioitumiseen ja mikä merkitys vaurioilla on ratapölkyn käyttöikänsä. Toisin sanoen milloin vauriot ovat niin vakavia, että ratapölkky ei pysty enää täyttämään sille asetettavia vaatimuksia.

Ratapölkkytutkimuskokonaisuuteen kuuluvat kirjallisuusselvitys ja haastattelut on raportoitu osaraportissa 1 (Rantala et al 2013). Tässä raporttiosiossa 2 ongelmaa lähestytään kokeellisen ja laskennallisen tutkimuksen keinoin. Luvussa 2 ja kohdassa 3.2 esitetään ratapölkkyjen laboratorikuormituskokeet ja kohdissa 3.1, 3.3 ja 3.4 kenttäkokeet. Luku 2 tarkastelee ratapölkkyjen kuormituskäyttäytymistä standardien mukaisilla painumattomilla tuilla ja luku 3 ratapölkyn yhteistoimintaa ratapenkereen kanssa. Tulosten pohjalta esitetään luvussa 4 laskelmia ja ohjeita uusien ratapölkkyjen suunnittelua varten. Luvussa 5 esitetään betonin rapautumistestaus tuloksineen. Yhteenveto ja tutkimuksen eri osioita yhteen nivova pohdinta on esitetty luvussa 6 ja päätelmät tiiviissä muodossa luvussa 7.

Staattiset että dynaamiset laboratorikuormituskokeet painumattomilla tuilla tehdään standardiin SFS-EN 13230 pohjautuen. Kokeita tehdään niin käyttämättömille kuin käytöstä poistetuillekin ratapölkkyille. Lisäksi laboratoriossa tehdään pitkäkestoisia toistokuormituskokeita sekä painumattomilla tuilla (pölkyn väsytyks) että tiivistettyjen maakerrosten varaan perustettuina (pölkyn painumisen ja rasiusten muutok-

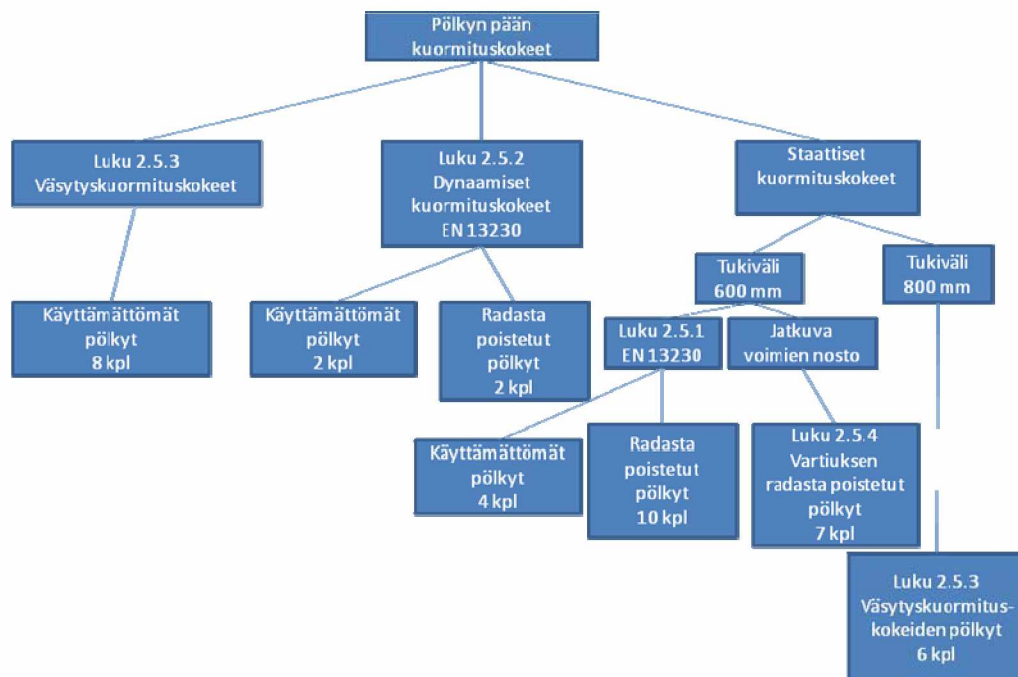
set). Kenttäkokeilla määritetään raiteen pituus- ja poikittaissuuntainen vastus käytöstä poistetulla ratapihalla ja mitataan ratapölkkyjen rasituksia useilla rataosuuksilla ja todellisilla junakuormilla. Lisäksi tutkitaan ratapölkkyjen betonin rapautumista laajan koeohjelman mukaisesti.

2 Betoniratapölkkyjen kuormituskokeet laboratoriossa

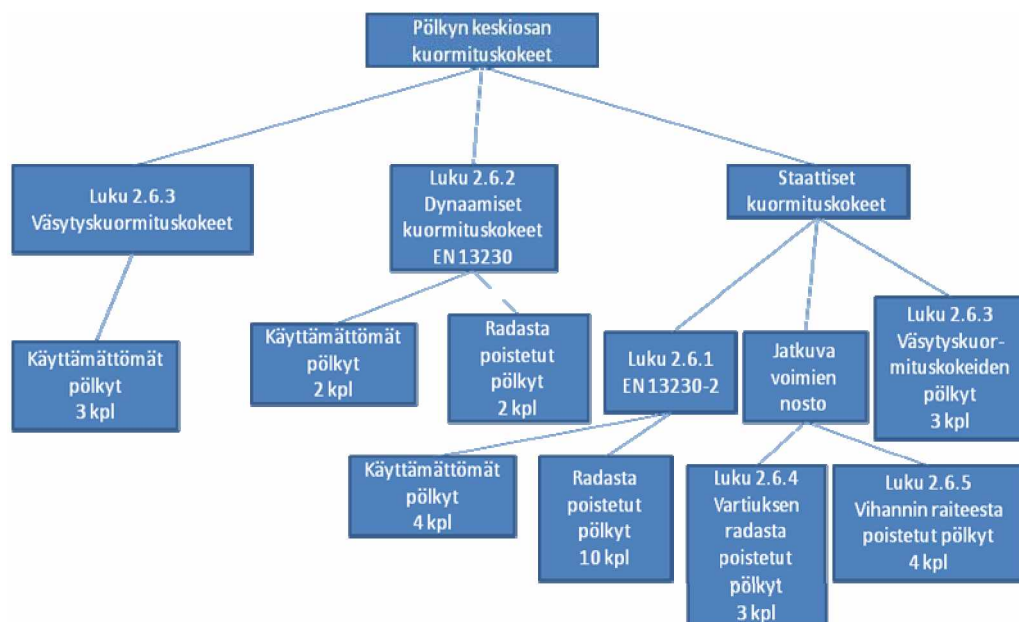
2.1 Koeohjelma

2.1.1 Yleiskuvaus

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on tehty laaja-alaista tutkimustyötä koskien betoniratapölkkyjä. Tutkimustyön osana oli kattava kuormituskokeita sisältävä osuus. Kuva 2.1 esittää kootusti betoniratapölkyn päälle tehdyt kuormituskokeet ja kuva 2.2 esittää kootusti betoniratapölkyn keskiosalle tehdyt kuormituskokeet.



Kuva 2.1 Ratapölkyn pään kuormituskokeiden koeohjelma.



Kuva 2.2 Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeiden koeohjelma.

2.1.1.1 Staattiset ja dynaamiset kokeet

Kuormituskokeita tehtiin käyttämättömille ja eri syistä käytöstä poistetuille ratapölkkyille. Kokeet tehtiin standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti. Kokeiksi valittiin staattiset kuormituskokeet ratapölkyn päälle ja keskiosalle sekä dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn päälle. Lisäksi standardista poiketen tehtiin dynaamisia kuormituskokeita ratapölkyn keskiosalle. Standardin asettamien vaatimusten lisäksi kuormituskokeiden aikana mitattiin ratapölkyn pystysiirtymiä ja betonin venymiä.

Kuormituskokeiden tarkoituksena oli vertailla käyttämättömien ja käytöstä poistettujen ratapölkkyjen eroja. Lisäksi tehtyjen kuormituskokeiden tuloksista saatiin vertailutietoa aiemmin Suomessa tehtyjen Liikenneviraston betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (RHK 2008) mukaisiin kuormituskokeisiin.

Luvuissa 2.4.1 ja 2.4.2 tarkemmin kuvattuja staattisia kuormituskokeita tehtiin 28 kappaletta ja dynaamisia kuormituskokeita (luku 2.4.3 ja 2.4.4) kahdeksan kappaletta. Kuormituskokeita tehtiin taulukon 2.1 mukaisesti sekä käyttämättömille (luku 2.3.1) että käytöstä poistetuille (luku 2.3.2) ratapölkkyille.

Taulukko 2.1 Tehdyt kuormituskokeet.

Kuormituskoe	Käyttämätön	Käytöstä poistettu
Staattinen ratapölkyn pää	4	10
Staattinen ratapölkyn keskiosa	4	10
Dynaaminen ratapölkyn pää	2	2
Dynaaminen ratapölkyn keskiosa	2	2

2.1.1.2 Väsytytkuormituskokeet

Väsytytkuormituskokeita (luku 2.4.6) tehtiin käyttämättömille ratapölkkyille yhteensä 11 kpl. Kokeista kahdeksan tehtiin ratapölkyn päälle ja kolme pölkyn keskiosalle. Li-

säksi yksi ratapölkky kuormitettiin pelkästään staattisesti vertailutuloksen saamiseksi. Väsytytkuormituskokeiden pölkkyt olivat käyttämättömiä. Kuormitus syklien määrä kokeissa oli 200000. Kuormitustasot pyrittiin valitsemaan siten, että väsymisen merkitystä todellisessa käyttötilanteessa pystyttiin arvioimaan.

2.1.1.3 Vihannin raiteessa halkeilleet ratapölkkyt

Rataosalta Ylivieska-Oulu toimitetuille neljälle ratapölkylle tehtiin staattiset kuormituskokeet. Kuormituskokeet tehtiin pölkyn keskiosalle. Standardin SFS-EN 13230-2 mukaisista kuormituskokeista poiketen kuormia nostettiin tasaisella nopeudella aina murtoon asti. Pölkkyistä kaksi oli halkeilleita ja kaksi silmämääräisesti arvioiden ehjiä. Kokeiden tarkoituksena oli arvioida halkeamien merkitystä ratapölkyn käytön kannalta.

2.1.1.4 Vartiuksen radasta poistettut pölkkyt

Vartiuksen radasta poistettuja pölkkyjä toimitettiin Tampereen teknilliselle yliopistolle. Pölkkyt sisälsivät silmämääräisesti arvioiden hyvä- ja huonokuntoisia sekä kohtalaisesti vaurioituneita. Staattisia kuormituskokeita (luku 2.4.7) tehtiin yhteensä kymmenen kappaletta, joista seitsemän tehtiin pölkyn päälle ja kolme keskiosalle. Standardin SFS-EN 13230-2 mukaisista kuormituskokeista poiketen kuormia nostettiin tasaisella nopeudella aina murtoon asti. Lisäksi kahdeksasta pölkystä otettiin näytteet rapautumistutkimuksia varten (luku 5).

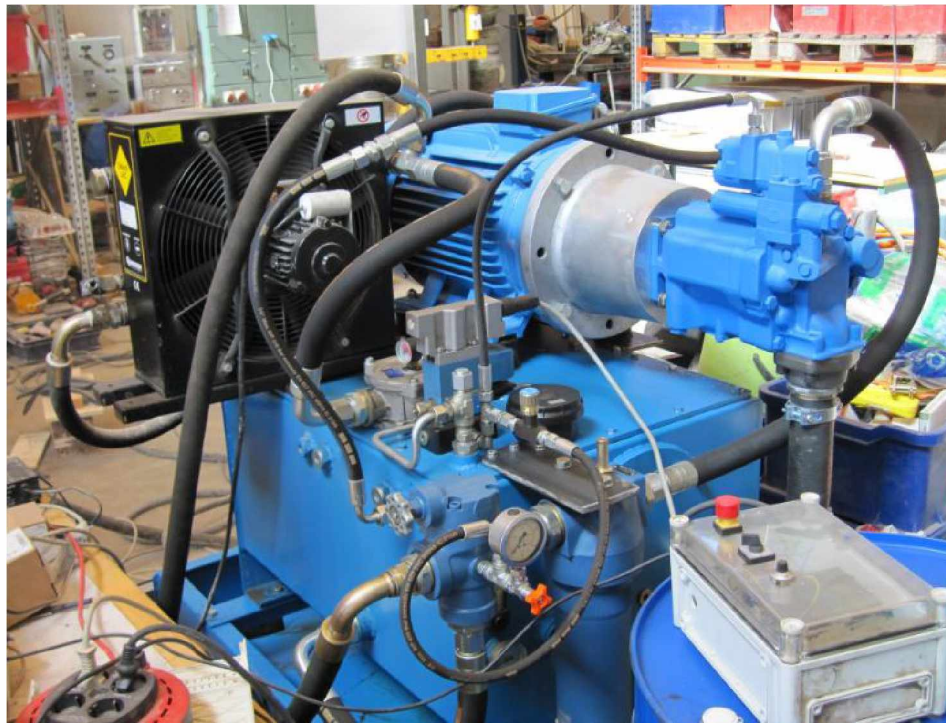
2.1.2 Kuormituslaitteisto

Kuormituskokeita varten rakennettiin laboratorioon kuvassa 2.3 oleva kuormituskehä, jolla pystyttiin tekemään niin ratapölkyn pään kuin keskiosankin kuormituskokeet. Ratapölkkyyn kohdistettua voimaa mitattiin hydraulisyylinterit yhdistävän teräslevyn alle asennetulla voima-anturilla tai yhtä hydraulisyylinteriä käytettäessä sylinterin varren päähän asennetulla voima-anturilla. Voima-antureita on käsitelty tarkemmin luvussa 2.1.3.4



Kuva 2.3 Kokeita varten rakennettu kuormituskehä.

Standardissa SFS-EN 13230-2 olevaa dynaamista kuormituskoetta varten jouduttiin kokoamaan kuvassa 2.4 oleva hydraulikoneikko. Syynä tähän oli kokeessa muodostuvat suuret pystysuuntaiset siirtymät yhdistettynä suuriin voimiin. Pystysiirtymät asettivat suuret vaatimukset koneikon öljyntuotolle. Käytetty hydraulipumppu on aksiaalimäntäpumppu, jonka malli on EATON Vickers PVH98QIC. Pumpun voimanlähteenä toimi 22 kW sähkömoottori. Kyseisellä moottorilla varustettuna pumpun öljyntuotto oli noin 150 l/min ja se kykeni tuottamaan lähes 160 barin paineen.



Kuva 2.4 Kuormituskokeissa käytetty hydraulikoneikko.

Kuormituskehässä oli ratapölkyn pään kuormituskokeita (luku 2.5) varten kolme sisähalkaisijaltaan 160 mm ja iskupituudeltaan 600 mm hydraulisylinteriä. Sylinterien varret oli kiinnitetty 80 mm paksuiseen teräslevyyn, johon varret olivat upotettu 50 mm. Sylintereistä pystyttiin saamaan 160 barin paineella yhteensä noin 960 kN voima.

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa (luku 2.6) käytettiin kuormituskehässä olevan ylälevyn keskelle kiinnitettyjä sisähalkaisijaltaan 80 mm tai 125 mm ja iskupituudeltaan 600 mm hydraulisylintereitä. Seuraavassa kuvassa 2.5 on esitetty ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen muokattu kuormituskehä. Sisähalkaisijaltaan 80 mm hydraulisylinterillä saavutettiin noin 75 kN voima ja 125 mm hydraulisylinterillä 180 kN voima.



Kuva 2.5 Ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen muokattu kuormituskehä.

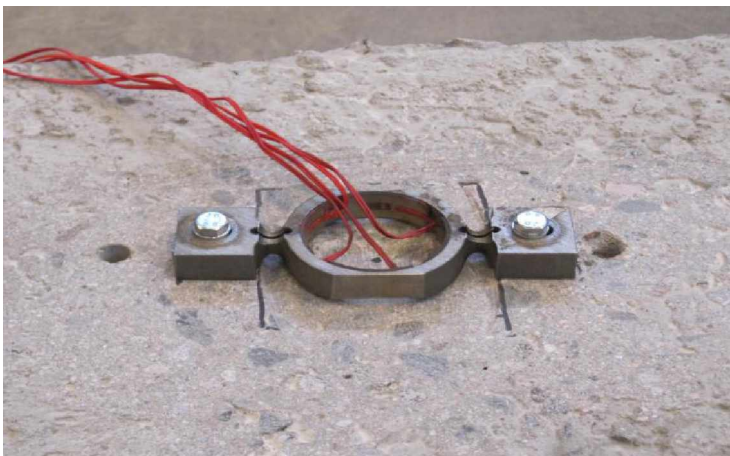
Kuormituslaitteiston ohjaamiseen ja mittausdatan tallentamiseen käytettiin DasyLab nimistä tietokoneohjelmistoa. DasyLab-ohjelmistoon pystyttiin ohjelmoimaan staattisissa ja dynaamisissa kuormituskokeissa käytetyt kuormituskäyrät.

2.1.3 Mittalaitteet kuormituskokeissa

2.1.3.1 Venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet

Kuormituskokeissa betonin venymien mittaamiseen käytettiin TTY:llä kehitettyä silmukkamallista venymäanturia. Kuvassa 2.6 esitettävä anturi koostuu teräksisestä silmukasta, johon on liimattu samansuuntaisesti neljä venymäliuskaa. Venymäliuskat oli kytketty toisiinsa siltakytkennällä. Anturi mittaa venymän 100 mm matkalta.

Anturi kiinnitettiin ratapölkkyyn luvussa 2.1.3.6 esitetyn mukaisiin kohtiin pulteilla, millä vältettiin perinteisissä venymäliuskoissa esiintyvä mahdollisuus venymäliuskan irtoamiseen kuormituksen aikana. Liuskojen irtoaminen on merkittävä ongelma eritoten käytöstä poistettujen betonikappaleiden testauksessa. Perinteisiin venymäliuskoihin verrattuna silmukkamallisen anturin etuna on lisäksi sen kyky jatkaa mittauksista halkeaman synnystä huolimatta.



Kuva 2.6 Kuormituskokeissa betonin venymien mittaamiseen käytetty silmukkamallinen venymäanturi.

Venymäsilmukan antamaan tulokseen vaikuttaa venymäliuskojen asento ja asema sekä silmukan geometria. Edellä mainituista syistä johtuen jokaiselle silmukka-anturille tulee määrittää oma kalibrointikerroin. Venymäsilmukat kalibroitiin siten, että ne kiinnitettiin kalibrointipenkkiin, jolla voitiin aikaansaada hyvin pieniä siirtymiä. Siirtymien liike mitattiin siirtymäantureilla mitaten samalla silmukan antamaa jännitteen arvoa ja syöttöjännitettä. Kalibroinnin tuloksena saatiin määritettyä pistejoukko, johon lineaarisella regressiolla sovitetun suoran kulmakerrointa voitiin käyttää kalibrointikertoimena.

Ensimmäinen käytetyistä venymäsilmukoista oli valmiiksi kalibroitu ja sen kalibrointikerroin oli 0,0809 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$. Toinen käytetyistä venymäsilmukoista kalibroitiin TTY:n laboratoriohallissa ja sen kalibrointikerroin oli 0,0879 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$.

2.1.3.2 Erityishuomiot ratapölkyn venymämittauksesta

Jokaisessa tehdyssä kuormituskokeessa mitattiin betonin venymiä. Ratapölkkyissä jo olemassa olleet halkeamat muodostuivat ongelmallisiksi venymien mittauksen yhteydessä, vaikka venymien mittaukseen käytetty venymäsilmukka pystyikin jatkaamaan mittauksia halkeamista huolimatta. Venymämittauksista saadut tulokset ovat kuitenkin täysin vertailukelpoisia vain niiden ratapölkkyjen osalta, joissa ei ollut halkeamaa ennen kuormittamista ja näidenkin pölkkyjen osalta vain ensimmäisen halkeaman muodostumiseen asti. Kuten luvussa 2.1.3.1 kerrottiin, venymäsilmukka mittaa venymää 100 mm matkalta. Ratapölkkyihin muodostuvat, tai niissä jo ennen kuormittamista olemassa olleet halkeamat eivät välttämättä sijainneet anturin mitta-alueella. Tästä johtuen venymämittaustuloksissa saattoi olla suurtakin eroa riippuen siitä oliko halkeama mitta-alueella tai esimerkiksi juuri mitta-alueen ulkopuolella. Halkeaman muodostuttua anturin mitta-alueelle ei halkeaman muodostumisen jälkeen mitattu venymä ollut enää pelkästään betonin venymää vaan mitatuissa venymissä merkittävä osa oli jänneterästen venymää halkeaman kohdalla.

Ratapölkkyyn kohdistuvaa vetoa arvioitaessa tulee huomioida myös esijännityksen aiheuttama puristuma. Esijännityksen aikaansaama puristuma pitää ylittyä ennen kuin betonissa päädytään vedon puolelle. Puristuman suuruuden voidaan laskea olevan B97- ja BP99-ratapölkkyjen keskiosassa noin 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ ja kiskon kohdalla suuremman poikkileikkausalan johdosta noin 140 $\mu\text{m}/\text{m}$. Keskiosan puristuman laskeminen on esitetty alla.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{-7,7 \text{ MN}/\text{m}^2}{38700 \text{ MN}/\text{m}^2} = -0.000199 \quad (2-1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{kesk}}} = \frac{-275 \text{ kN}}{\frac{150 + 235}{2} * 185 \text{ mm}^2} \quad (2-2)$$

$$E = 5000 \sqrt{60} \text{ MN}/\text{m}^2 \quad (2-3)$$

2.1.3.3 Siirtymäantureihin perustuvat mittalaitteet

Tutkimuksissa käytettiin luvun 2.1.3.6 mukaisesti siirtymäantureita, jotka ovat tyypiltään potentiometrejä. Anturit olivat malliltaan Novotechnik TRS 50 (kuva 2.7) ja niitä käytettiin pystysuuntaisten siirtymien mittaamiseen. Antureissa on 50 mm liikevara. Käytetyt anturit sopivat hyvin kohteisiin, joissa ne joutuvat värinän vaikutuksen alai-

siksi ja kohteisiin, joissa tarvitaan pitkää elinikää. Valmistaja lupaa anturin kestävän $100 \cdot 10^6$ edestakaista liikettä. Kyseisen anturityypin toimintalämpötila on $-30 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$ ja antureiden tarkkuus on parempi kuin $0,01 \text{ mm}$ (Novotechnik 2010).



Kuva 2.7 Käytetty siirtymäanturityyppi Novotechnik TRS 50 (Novotechnik 2010).

Siirtymäanturit kalibroitiin TTY:n koehallissa. Siirtymäantureiden kalibroinnin tuloksena saatiin kerroin $[\text{mm/V}]$. Kerroin ilmoittaa, kuinka suuren siirtymän anturi kokee mitattavan jännitteen muuttuessa yhden voltin kokeessa käytettävällä syöttöjännitteellä. Kalibrointikertoimeksi saatiin $51,894 \text{ mm/V}$. Kyseisessä kertoimessa on jo huomioitu mittauksessa käytetyn vahvistimen oma syöttöjännite, joka oli $5,248 \text{ V}$.

2.1.3.4 Voima-anturit

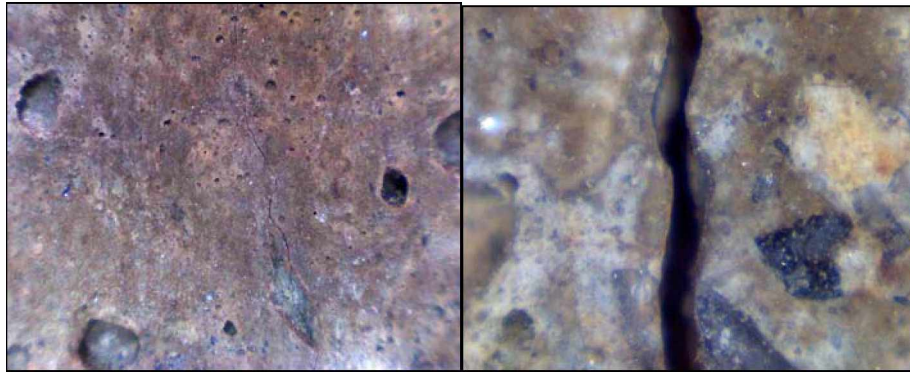
Kuormien mittaukseen käytettiin TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön voimaantureita 4552005 ja 105-455. Voima-anturit ovat tarkoitettu suurten voimien mittaamiseen, niin laboratoriossa kuin maastossakin.

Voima-anturi 105-455 kalibroitiin TTY:n koehallissa. Tieto kerättiin talteen kuormituskokeissakin käytetyllä dataloggerilla, jonka malli oli IOTech Personal Daq 3000. Mittausta ohjasi mittausohjelmisto DasyLab, jota käytettiin myös kuormituskokeissa sekä ohjaus- että datan tallioimisohjelmistona. Voima-anturista saatava signaali on mikrovolttien suuruusluokkaa ja se vahvistetaan vahvistimen avulla volttiluokan signaaliksi. Tällöin kalibrointikertoimen yksiköksi saadaan $\text{kN}/\mu\text{V/V}$. Voima-anturin 105-455 kalibrointikertoimeksi saatiin $833292 \text{ kN}/\mu\text{V/V}$. Kertoimen oikeellisuus varmistettiin kuormittamalla anturi toistamiseen kalibrointiin käytetyllä kuormituslaitteistolla.

Voima-anturi 4552005 oli hiljattain kalibroitu ja sen kerroin oli $228919 \text{ kN}/\mu\text{V/V}$. Kertoimen oikeellisuus kuitenkin varmistettiin koekuormittamalla voima-anturi.

2.1.3.5 Halkeamien mittaus

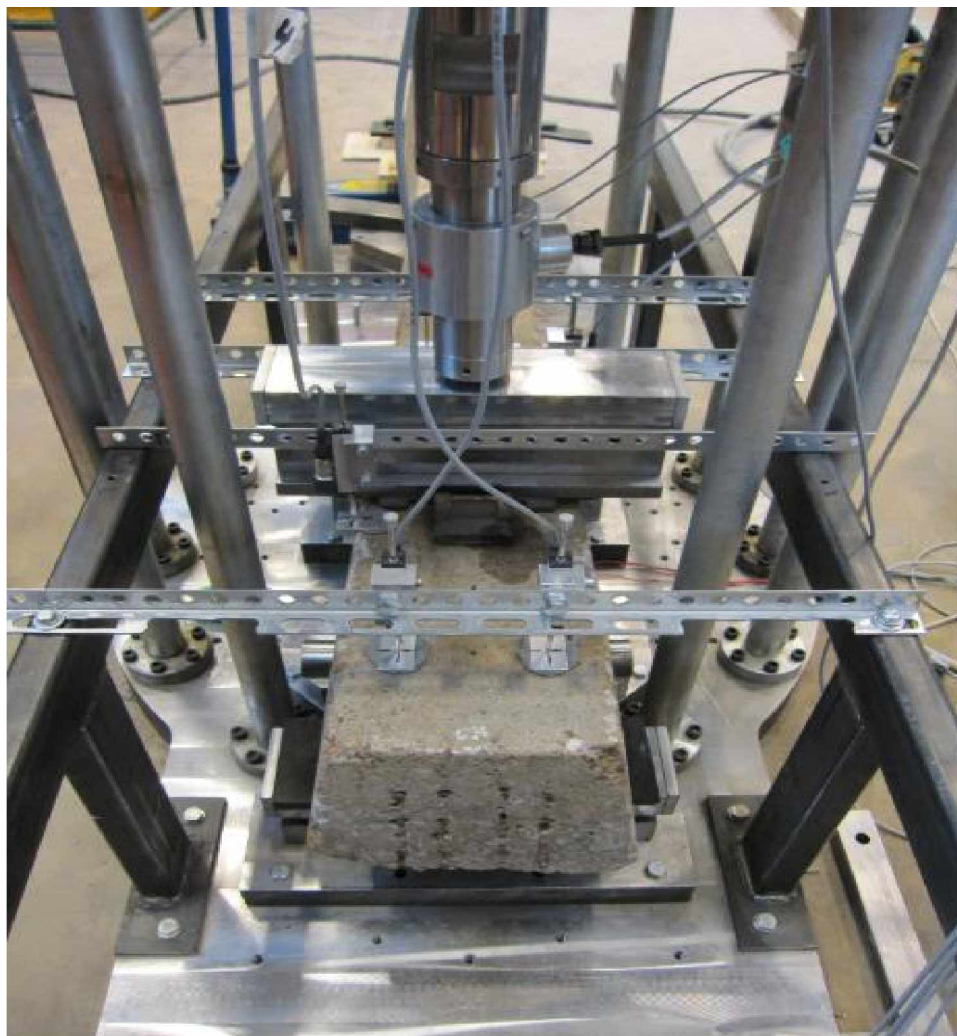
Halkeamien etsimiseen ja mittaukseen käytettiin tietokoneeseen kytkettävää digitaalista mikroskooppia. Mikroskoopilla pystyttiin ottamaan 2 megapikselin valokuvia, jotka voidaan siirtää AutoCad-ohjelmaan. AutoCad-ohjelmassa olevien vertailukuvien avulla pystyttiin määrittämään halkeaman leveys. Kuvassa 2.8 on esitetty tyypilliset 50- ja 200-kertaisella suurennoksella otetut kuvat. Mikroskoopilla päästiin $0,01 \text{ mm}$ tarkkuuteen.



Kuva 2.8 Tyypilliset mikroskoopilla otetut kuvat. Vasemmalla 50x suurennos ja oikealla 200x suurennos. Kuvat eivät esitä samaa halkeamaa.

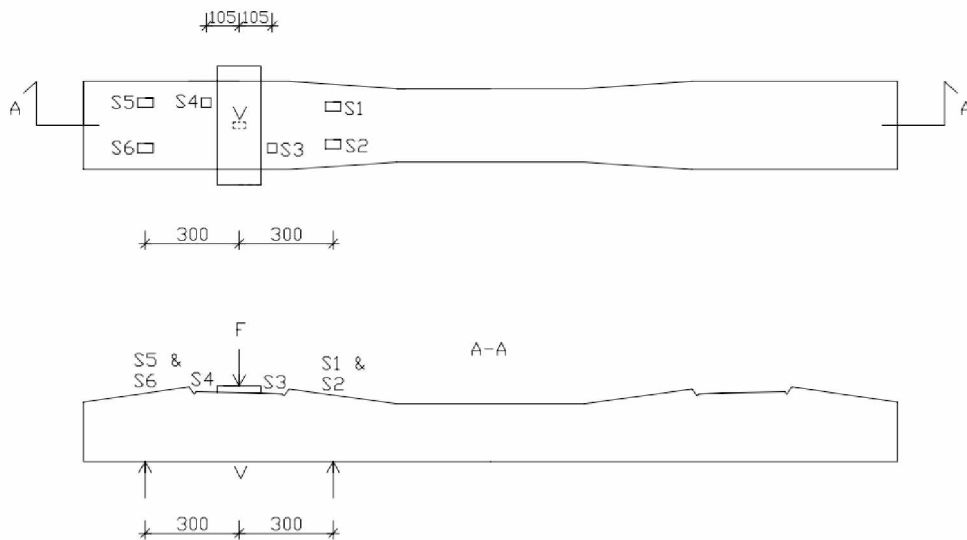
2.1.3.6 Mittalaitteiden asennus

Pystysiirtymäantureiden asennusta varten kuormituskehään valmistettiin kuvassa 2.9 näkyvät pulteilla kiinnitettävät telineet.

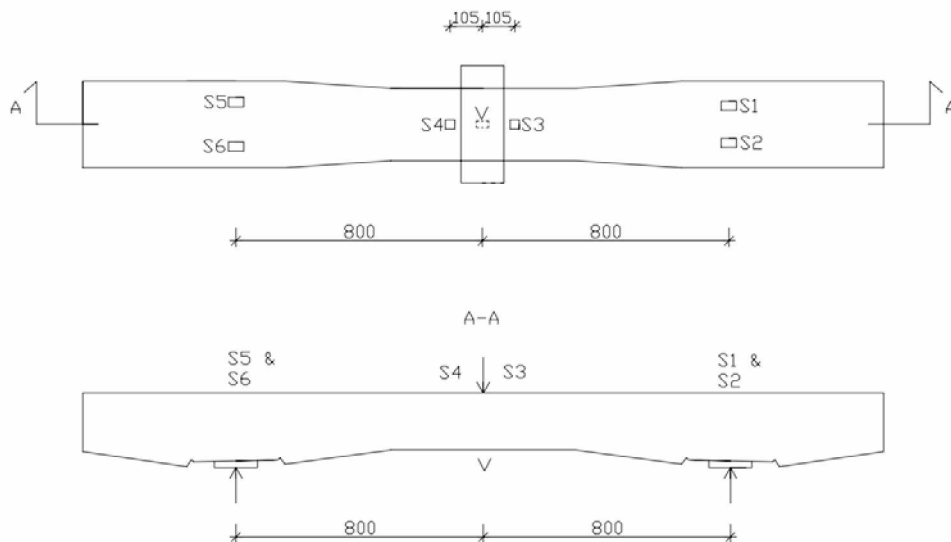


Kuva 2.9 Kuormituskehä siirtymäanturit kiinnitettynä.

Teräsprofiilista valmistettuihin telineisiin kiinnitettiin L-kiskot, joissa itse siirtymäanturit olivat kiinni. Siirtymäanturit sijoitettiin seuraavien kuvien 2.10 ja 2.11 mukaisesti siten, että antureista neljä sijaitsi suoraan ratapölkyn alapuolisten tukien keskilinjalla. Kyseisellä anturien sijoittelutavalla pyrittiin seuraamaan mahdollisia ratapölkkyssä tapahtuvia kiertymiä, mitkä saattoivat johtua mm. tukien kohdalta lohjenneista betonin kappaleista. Lisäksi antureista kaksi oli sijoitettu 105 mm etäisyydelle kuormituspisteen keskilinjasta.



Kuva 2.10 Ratapölkyn venymäanturin (V) ja ratapölkyn pystysiirtymäantureiden (S) sijoittelukaavio pölkyn pään kuormituskokeessa.



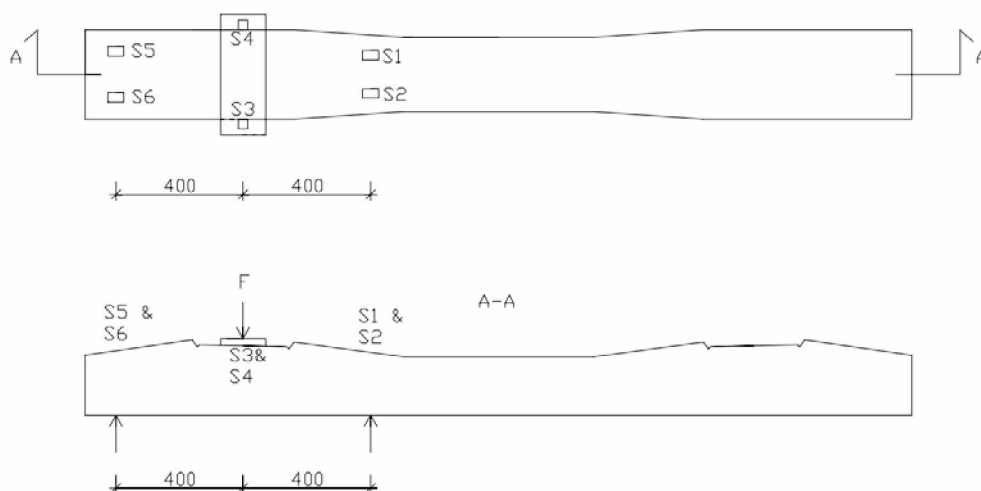
Kuva 2.11 Ratapölkyn venymäanturin (V) ja ratapölkyn pystysiirtymäantureiden (S) sijoittelukaavio pölkyn keskiosan kuormituskokeessa.

Siirtymäantureita varten ratapölkkyyn kiinnitettiin kooltaan 30x50 mm² alumiiniliuskoja, jotka asennettiin vaakatasoon. Kyseisten liuskojen tarkoituksena oli vähentää ratapölkyn mahdollisista pituus- ja sivusuuntaisista liikkeistä pystysiirtymiin aiheutuvaa virhettä. Jo pienikin ratapölkyn liikkuminen olisi aiheuttanut merkittävää

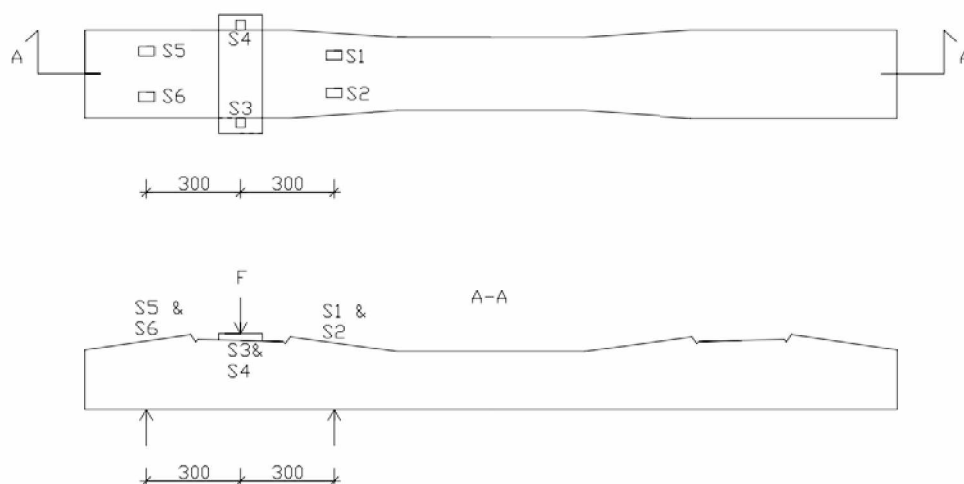
virhettä siirtymämittaustuloksiin, mikäli viistoja tai muuten epätasaisia pintoja ei olisi suoristettu alumiiniliuskojen avulla.

Venymämittaus tehtiin suoraan kuormituslinjan alapuolelta, jossa kuormituskokeessa muodostuva taivutusmomentti aikaansaa suurimman venymän. Venymäsilman asennusta varten kiinnityskohta hiottiin tasaiseksi ja silmukan kiinnityspisteiden väliin hiottiin noin yhden millimetrin syvennys. Kyseisellä syvennyksellä varmistettiin se, että silmukka ei kantanut mistään kohdasta mitta-alueella ja näin ollen aiheuttanut virhettä venymätuloksiin.

Epäonnistuneiden pölkyn pään taipumamittausten (kappale 2.5.2) johdosta keskimäisten siirtymäanturien sijoittelua muutettiin väsytytkuormituskokeissa kuvien 2.12 ja 2.14 mukaiseksi. Kuva 2.13 esittää Vartiuksen radalta poistettujen pölkkyjen pään kuormituskokeissa käytetyn anturisijoittelun.



Kuva 2.12 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa käytetty anturisijoittelu.



Kuva 2.13 Vartiuksen pölkkyjen pölkyn pään kuormituskokeissa käytetty anturisijoittelu.



Kuva 2.14 Pölkyn pään väsytyskuormituksissa käytetty anturisijoittelu.

2.2 Kuormien valintaperusteet

2.2.1 SFS-EN 13230-2:n mukaiset kokeet

Standardissa SFS-EN 13230-2 on ohjeistettu ratapölkkykohtainen vertailukoekuormien laskenta. Vertailukoekuormia tarvitaan kuormituskokeissa käytettävien kriteerien määrittämiseen. Standardin määrittämän ensimmäisen kriteerin mukaisesti ratapölkyn tulee kestää kuormituskokeissa vertailukoekuorman suuruinen kuorma halkeamatta. Lisäksi standardi esittää kriteerit kuormalle, mikä vaaditaan pysyvän 0,05 mm halkeaman muodostumiselle, sekä suurimmalle kuormalle, joka ratapölkyn tulee pystyä vastaanottamaan. Ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa ratapölkyn pitää kestää vertailukoekuorma 1,8-kertaisena ilman pysyvää 0,05 mm halkeamaa. Lisäksi suurimman kuorman, joka ratapölkyn on pystyttävä vastaanottamaan, on oltava 2,5-kertainen vertailukoekuormaan nähden. Vastaavasti dynaamisissa kuormituskokeissa kertoimet ovat 1,5 ja 2,2.

UIC Code 713 Desing of monoblock concrete sleepers (2004) on tarkoitettu tukemaan EN-standardia. Ohjeistuksessa opastetaan yksiosaisen betoniratapölkyn suunnittelua ja mitoitus- ja taivutusmomentin määrittämistä. Tässä kappaleessa esitettävien kaavojen 1-4 avulla pystytään määrittämään vertailukoekuormien laskemiseen tarvittavat mitoitus- ja taivutusmomentit. Sijoittamalla kaavoista 3 ja 4 saadut mitoitus- ja taivutusmomentit kaavoihin 5 ja 6 saadaan kuormituskokeissa käytettävät vertailukoekuormat.

Alla on esitetty kaavoissa 1-6 käytettävät merkinnät ja UIC 713:n mukaiset tyypilliset kertoimien arvot.

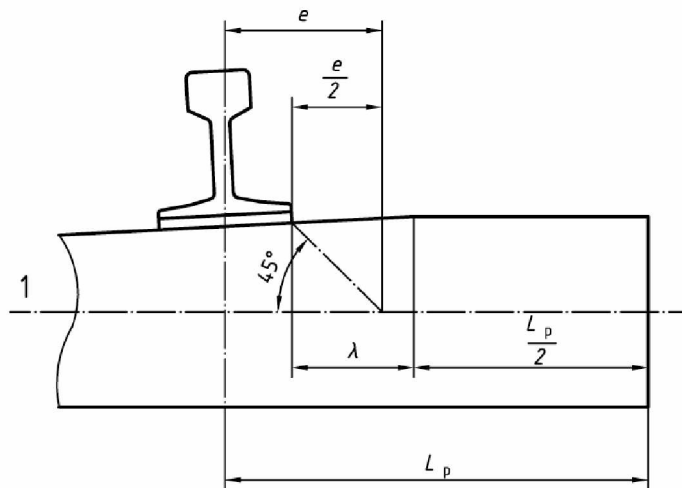
Q_0	Staattinen akselikuorma [kN]
λ	Sisäinen momenttivarsi [m]
L_p	Etäisyys kiskon lepopinnan keskilinjalta ratapölkyn päähän [m]
L_r	Tukien keskilinjojen väli ratapölkyn pään kuormituskokeissa; 0,6 m, kun $L_p \geq 0,450$ m
L_c	Kiskon lepopintojen keskipisteiden välinen etäisyys; 1,6 m
d	Ratapölkyn korkeus kiskon lepopinnan keskilinjalta [m]
e	Kuorman jakautuman leveys [m] (ks. Kuva 2.15)
P_d	Ratapölkkyyn kiskon kohdalle kohdistuva mitoituskuorma [kN]
M_{dr+}	Positiivinen mitoitustaivutusmomentti kiskon lepopinnan kohdalla [kNm]
M_{dc-}	Negatiivinen mitoitustaivutusmomentti ratapölkyn keskellä [kNm]
γ_p	Kerroyin kiskonkiinnitysten iskukuormien vaimennuskyvyille. Tyypilliset arvot UIC 713:n mukaan ovat: vähäinen vaimennus 1,0, keskitasoinen vaimennus 0,89 ja suuri vaimennus 0,78. Tässä kappaleessa esitettyjen vertailukoekuormien laskennassa käytetty kerroyin on 1,0.
γ_v	Dynaaminen junan nopeuden mukaan määräytyvä kerroyin, jolla huomioidaan radan ja kaluston poikkeavuuksia. Suositellut arvot ovat 0,5 kun junan nopeus on alle 200 km/h ja 0,75 junan nopeuden ollessa yli 200 km/h.
γ_d	Kerroyin kuormien jakautumiselle ratapölkkyjen kesken. Suositeltava arvo on 0,5.
γ_r	Kerroyin ratapölkyn tukireaktiolle, jolla huomioidaan tuennan vaihteluita. Tyypillinen arvo on 1,35.
γ_i	Kerroyin dynaamiselle lisälle taivutusmomenttiin. Dynaaminen lisä johtuu epäsäännöllisyyksistä ratapölkyn pituussuuntaisessa tuennassa. Tyypillinen arvo on 1,6.
I_c	Jäyhyysmomentti ratapölkyn keskellä
I_r	Jäyhyysmomentti kiskon lepopinnan keskellä
F_{ro}	Ratapölkyn pään vertailukoekuorma [kN]
F_{co}	Ratapölkyn keskiosan vertailukoekuorma [kN]

Ratapölkkyyn kiskon kohdalla kohdistuvaa mitoituskuormaa käytetään mitoitustaivutusmomentin määrittämiseen. Kiskon lepopinnan mitoituskuorma voidaan laskea kaavalla 2-4.

$$P_d = \frac{Q_0}{2} (1 + \gamma_p * \gamma_v) * \gamma_d * \gamma_r \quad (2-4)$$

Kaavassa 2-5 on esitetty sisäisen momenttivarren λ laskeminen. Kaavassa L_p on kiskon lepopinnan keskipisteen etäisyys ratapölkyn päähän ja e on leveys kuorman jakautumalle. Seuraavassa kuvassa 2.15 on esitetty periaate sisäisen momenttivarren määrittämiseksi. Standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti kuorman jakautuman leveyttä määritettäessä voidaan käyttää olettamusta $e=0,15/2+d/2$, kun käytetään kiskoa 60E1. Kaavassa d on ratapölkyn korkeus kiskon lepopinnan keskilinjalla

$$\lambda = (L_p - e) / 2 \quad (2-5)$$



Kuva 2.15 Periaatekuva sisäisen momenttivarren määrittämiseen (SFS-EN 13230 2009).

Kaavassa 2-6 on esitetty kiskon lepopinnan mitoitustaivutusmomentin määrittäminen. Mitoitustaivutusmomentin avulla pystytään laskemaan vertailukoekuorma ratapölkyn päälle.

$$M_{dr+} = \gamma_i * P_d \lambda / 2 \quad (2-6)$$

Kaavassa 2-7 esitetään tapa määrittää mitoitustaivutusmomentti ratapölkyn keskiosalle. Ratapölkyn keskiosan mitoitustaivutusmomentti voidaan tilaajan suostumuksella määrittää ratapölkyn pään mitoitustaivutusmomentin, pölkyn keskiosan ja kiskon lepopinnan keskiosan jäyhyysmomenttien avulla.

$$M_{dc-} = 1,2 * M_{dr+} * \frac{I_c}{I_r} \quad (2-7)$$

Kaavalla 2-8 määritetään vertailukoekuorma ratapölkyn pään kuormituskokeisiin ja kaavalla 2-9 määritetään vertailukoekuorma ratapölkyn keskiosan kuormituskokeisiin.

$$F_{r0} = \frac{4M_{dr}}{L_r - 0,1} \quad (2-8)$$

Suomessa käytettäville ratapölkkipituuksille 2500 mm ja 2600 mm vertailukoekuorma kiskon lepopinnan kohdalla on $F_{r0}[\text{kN}] = 8M_{dr}[\text{kNm}]$.

$$F_{c0} = \frac{4M_{dc}}{L_c - 0,1} \quad (2-9)$$

Kaavojen 2-4-2-9 avulla pystytään määrittämään vertailukoekuormat, jotka ovat ratapölkky- ja ratakohtaisia. Vertailukoekuormaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ratapölkyn ulkomitat, liikennöivän kaluston akselipaino, käytettävän välilevyn jäykkyys sekä radalla sallittavat junien liikennöintinopeudet.

Seuraavassa taulukossa 2.2 on esitetty laskettuja vertailukoekuormia Parma Oy:n valmistamalle ratapölkkytyypille BP99. Kuormituskokeiden tulosten vertailun helpottamiseksi kokeissa käytettiin vain BP99:lle määritettyä vertailukoekuormaa, joka vastasi 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h. Kyseinen vertailukoekuorma vastaa hyvin tarkasti 250 kN akselipainolla määritettyä vertailukoekuormaa, kun junan nopeus on alle 200 km/h. BP99-ratapölkkyille lasketut vertailukoekuormat vastaavat hyvin tarkasti B97-ratapölkyn vertailukoekuormia. Tämä johtui BP99- ja B97- ratapölkkyjen samansuuruisista ulkomitoista kiskon kohdalla ja pölkyn keskellä.

Taulukko 2.2 Lasketut vertailukoekuormat ratapölkkytyypille BP99.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]	λ [m]	P_d [kN]	M_{dr+} [kNm]	M_{dc-} [kNm]	F_{ro} [kN]	F_{co} [kN]
200	>200	0,1575	118,1	14,88	8,85	119,1	23,60
215	>200	0,1575	127,0	16,00	9,51	128,0	25,37
225	<200	0,1575	113,9	14,35	8,53	114,8	22,76
250	<200	0,1575	126,6	15,95	9,48	127,6	25,29
265	<200	0,1575	134,2	16,90	10,05	135,2	26,80

Taulukossa 2.3 esitetään eri akselikuormille lasketut vertailukoekuorman arvot ja niiden perusteella määritetyt staattisissa kuormituskokeissa käytettävät kriteerit. Sitä seuraavassa taulukossa 2.4 esitetään vastaavat standardin määrittämät kriteerit ratapölkyn pään dynaamiselle kuormituskokeelle. Taulukossa $F_{ro,05}$ on kriteeri pysyvälle leveydeltään 0,05 mm halkeamalle ja F_{rB} kriteeri kuormitustasolle, jota ei pystytä kasvattamaan pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa. F_{cB} on kriteeri kuormitustasolle, jota ei pystytä kasvattamaan ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa.

Taulukko 2.3 Eri akselipainoille laskettuja vertailukoekuormia ja niiden perusteella määritetyt kriteerit staattisissa kuormituskokeissa.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]		F_{ro} [kN]	$F_{ro,05}$ [kN] K1=1,8	F_{rB} [kN] K2=2,5	F_{co} [kN]	F_{cB} [kN] K2=2,5 *
200	>200		119,1	214	298	23,6	59
215	>200		128,0	230	320	25,4	64
225	<200		114,8	207	287	22,8	57
250	<200		127,6	230	319	25,3	63
265	<200		135,2	243	338	26,8	67

* F_{cB} ei kriteerinä standardissa EN 13230-2:2009.

Esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (RHK 2008) mukainen kriteeri ensimmäiselle halkeamalle on 150 kN ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa. Vastaavasti pysyvän leveydeltään 0,05 mm halkeaman kriteeri on 240 kN ja kriteeri murtoa vastaan on 300 kN.

Taulukko 2.4 Eri akselipainoille laskettuja vertailukoekuormia ja niiden perusteella määritetyt kriteerit ratapölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]		F_{r0} [kN]	$F_{r0,05}$ [kN] K1=1,5	F_{rB} [kN] K2=2,2
200	>200		119,1	179	262
215	>200		128,0	192	282
225	<200		114,8	172	253
250	<200		127,6	191	281
265	<200		135,2	203	297

2.2.2 Väsytkuormituskokeet

Väsytkuormituskokeiden kuormat valittiin siten, että kuormituskokeiden avulla saataisiin selville voimatasot, joilla pölkkyssä alkaisi 200000 syklin aikana esiintyä väsymistä. Kuormituskokeiden tarkoituksena oli selvittää ratapölkkyjen väsymisominaisuuksia ja väsymisen vaikutusta ratapölkyn jäykkyyteen. Lisäksi tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan halkeaman merkitystä pölkkyissä. Väsytkuormitus syklien jälkeen pölkkyt kuormitettiin staattisesti murtoon. Staattisen kuormituskokeen tarkoituksena oli tarkkailla mahdollisia murtokuorman ja jäykkyyden muutoksia verrattuna väsytkuormittamattomaan pölkkyyn. Väsytkuormituskokeiden tulokset on esitetty luvussa 2.5.3

Pienimmät pölkyn pään koekuormat valittiin siten, että ne olivat pienemmät kuin halkeamarajatilan kuormat. Toinen 100 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky oli halkeilematon ja toiseen oli staattisesti aiheutettu kaksi halkeamaa ennen kuormitus sykliä. Ensimmäinen halkeama syntyi noin 150 kN kuormalla. Kuormien nostoa jatkettiin 180 kN saakka, jolloin pölkkyssä oli kaksi halkeamaa, joiden pituudet olivat noin 80 mm ja 90 mm.

Pölkyn keskiosan kokeissa pienin koekuorma oli aikaisemmin tehdyissä staattisissa kokeissa havaittua halkeamarajatilaa pienempi. Loput kaksi kuormitustasoa olivat halkeamarajatilan yläpuolella. Kuormituskokeiden syklien aikana käytetyt koekuormat on esitetty alla olevissa taulukoissa 2.5 ja 2.6.

Taulukko 2.5 Pölkyn pään väsytyskuormituskokeissa käytetyt koekuormat.

Kokeen numero	Koekuorma [kN]
8	100
9	100
14	150
12	170
13	190
16	195
11	220
15	230
10	Vain staattinen kuormitus

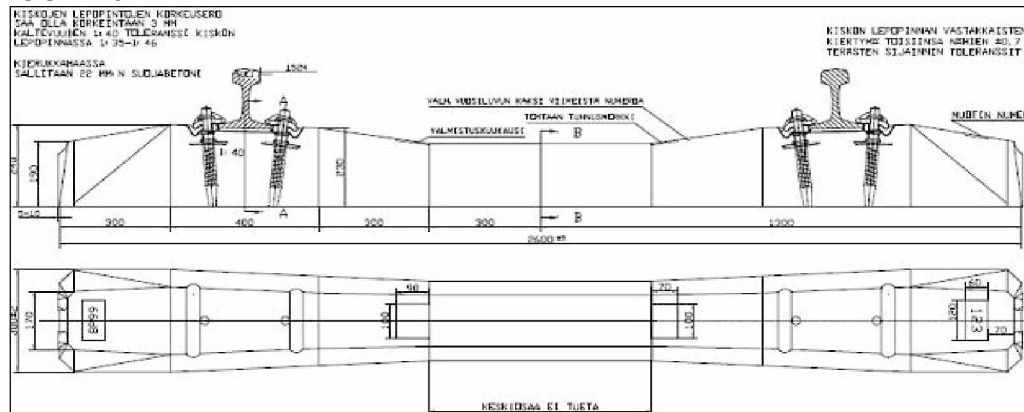
Taulukko 2.6 Pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeissa käytetyt koekuormat.

Kokeen numero	Koekuorma [kN]
6	37
7	55
5	70

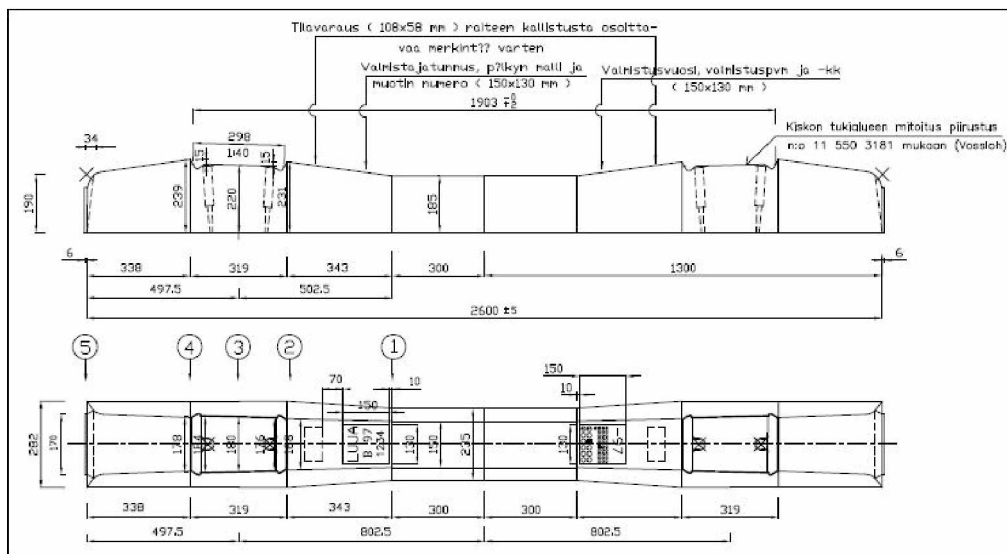
2.3 Koekuormitettujen ratapölkkyjen ominaisuudet

2.3.1 Käyttämättömät ratapölkkyt staattisissa ja dynaamisissa kokeissa

Kuormituskokeita tehtiin kahdelle käyttämättömälle ratapölkkytyypille. Ratapölkkytyypille ja edustivat kuvassa 2.16 oleva Parma Oy:n BP99 sekä kuvassa 2.17 oleva Lujabetoni Oy:n B97. Parma Oy:n pölkky oli valettu 30.11.2009 ja Lujabetoni Oy:n pölkky 13.3.2009.



Kuva 2.16 Parma Oy:n valmistama betoniratapölkky BP99.



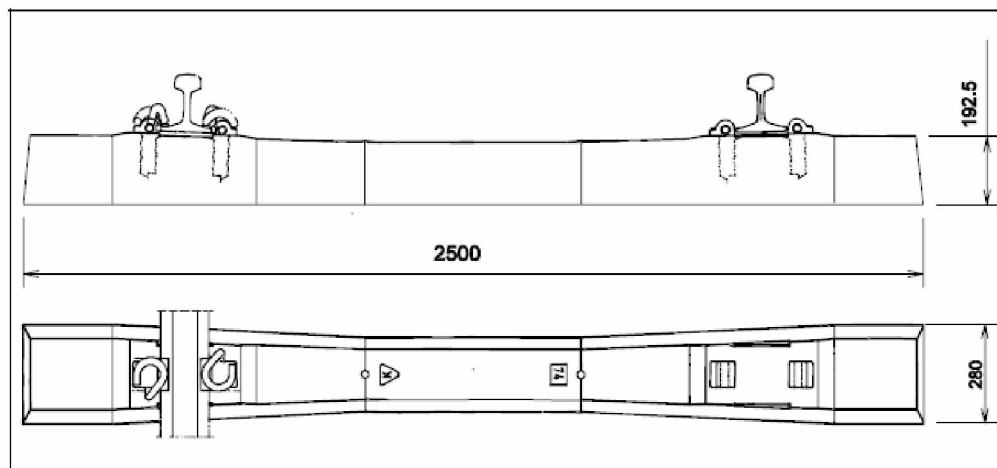
Kuva 2.17 Lujabetoni Oy:n valmistama betoniratapölkky B97.

2.3.2 Käytetyt ratapölkkyt

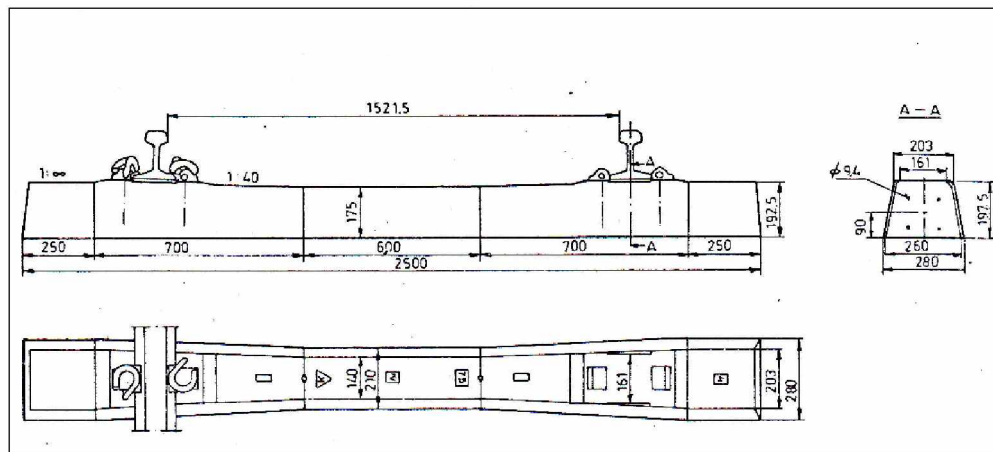
Käytöstä poistetut betoniratapölkkyt valikoitiin Kajaanissa sijaitsevalta varastoalueelta, johon niitä oli toimitettu eri puolilta Suomea. Toimitetut ratapölkkyt sisälsivät sekä vaurioituneita että vaurioitumattomia yksilöitä. Osa ratapölkkyistä oli poistettu käytöstä uusien kiskoprofiilien asennuksen vuoksi, kun uudet kiskot eivät soveltuneet jalan mittojen vuoksi radassa olleisiin ratapölkkyihin.

Testattavaksi toimitettuja ratapölkkyjä oli kolmea eri tyyppiä, jotka olivat B63, B75 ja BV75. Kuvissa 2.18 ja 2.19 esitettävät B63- ja B75-ratapölkkyt ovat ulkomitoiltaan muuten identtisiä, mutta B75-ratapölkkyt ovat hieman korkeampia kiskon lepopinnan kohdalta. B63- ja B75-ratapölkkyjen valmistuksessa on käytetty jälkijännitystekniikkaa. Jälkijännitystekniikkaa on käsitelty tarkemmin tämän tutkimuksen kirjallisuustutkimusosuudessa (Rantala et al. 2013). Jänneteräksinä oli käytetty halkaisijaltaan 9,4 mm terästankoja. BV75 on valmistettu esijännitystekniikkaa hyväksikäyttäen. Kyseisessä ratapölkkyssä on 12 kappaletta seitsemänlankaista jänneteräspunosta, jotka olivat halkaisijaltaan 6,4 mm (kuva 2.20).

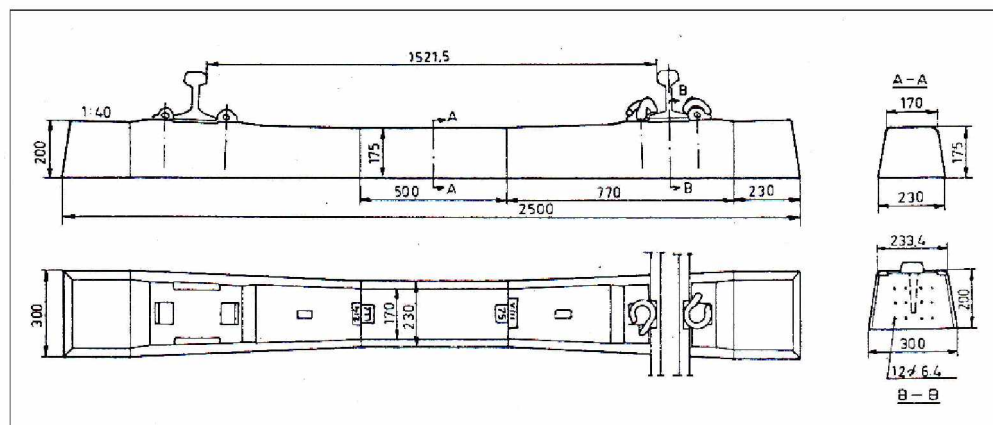
Kaikki toimitetut käytetyt ratapölkyt olivat 1970-luvulla valmistettuja ja Pandrol e-clip-kiinnitysjärjestelmällä varustettuja. B63-ratapölkyt olivat silmämääräisesti arvioiden selkeästi huonokuntoisimpia sisältäen runsaasti pituussuuntaisia halkeamia ja osasta pölkystä oli katkennut noin 100 mm kappale aktiivipäästä. B75 ja BV75 mallin pölkyt olivat yksittäisiä pienehköjä halkeamia ja betonin lohkeamia lukuun ottamatta silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia.



Kuva 2.18 Betoniratapölkky B63 (RHK 2002).



Kuva 2.19 Betoniratapölkky B75 (Grundfelt, P. 1980).



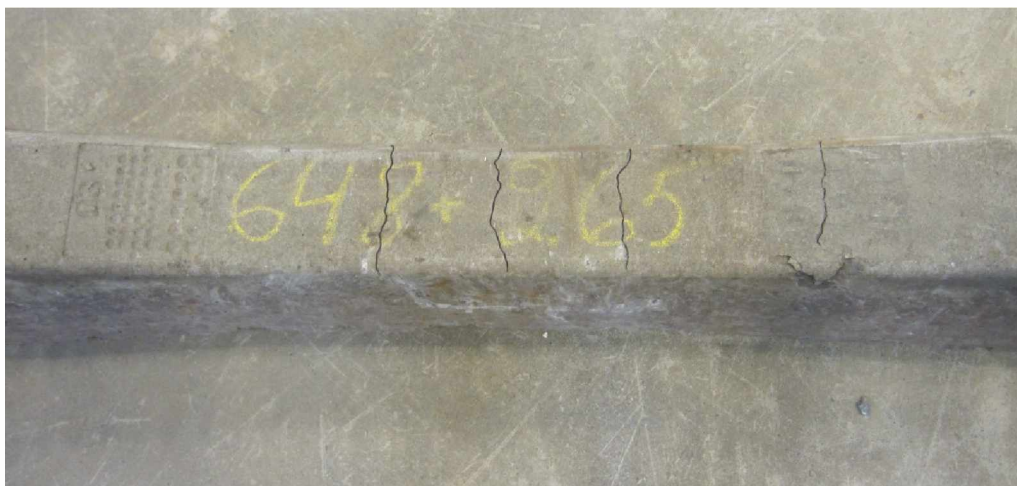
Kuva 2.20 Betoniratapölkky BV75 (Grundfelt, P. 1980).

Käytettyjen ratapölkkyjen erikoistapauksia koekuormituksissa edustivat luvussa 2.3.3 esiteltävät haljenneet Vihannin pölkkyt sekä luvussa 2.3.5 esiteltävät Vartiuksen pölkkyt.

2.3.3 Vihannin raiteessa haljenneet pölkkyt

Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitettiin koekuormitettavaksi neljä betoniratapölkkyä Pohjois-Pohjanmaalta väliltä Ylivieska-Tuomioja. Rataosuudella on havaittu useita betoniratapölkkyjä, joissa on ilmennyt halkeamia pölkyn yläpinnassa keskellä. Halkeamat ovat syntyneet pölkkyihin pian asentamisen jälkeen ja syynä halkeamien syntyyn on todennäköisesti pölkkyjen kantaminen keskeltä. Pölkkyjen tuenta on todennäköisesti ollut puutteellinen jo niiden asennuksen jälkeen, jolloin ensimmäiset junat on päästetty raiteelle. Toimitetuista betoniratapölkkyistä kaksi oli silmämääräisesti ehjiä ja kahdessa oli silmin havaittavia halkeamia pölkyn yläpinnassa keskellä. Haljenneet betoniratapölkkyt oli toimitettu liikennepaikkaväliltä Kangas-Oulainen (km 648+250 ja 648+265) ja silmämääräisesti ehjät pölkkyt liikennepaikkaväliltä Vihanti-Tuomioja (noin km 689).

Pölkkyt olivat Luja-betoni Oy:n vuonna 2003 valmistamia ja ne oli asennettu rataan vuosina 2003–2004. Kuvissa 2.21 ja 2.22 on esitetty haljenneet ratapölkkyt ennen kuormittamista. Silmämääräisesti pölkyn yläpinnassa havaitut halkeamat on vahvistettu tussilla.



Kuva 2.21 Radassa halkeillut betoniratapölkky, jonka yläpinnassa oli neljä silmin havaittavaa halkeamaa.



Kuva 2.22 Radassa halkeillut betoniratapölkky, jonka yläpinnassa oli kahdeksan silmin havaittavaa halkeamaa.

2.3.4 Väsytytkuormituskokeiden pölkyt

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa kuormituskokeissa kuormitettavana oli Lujabetoni Oy:n vuonna 2009 valmistamia B97 pölkkyjä ja pölkyn keskiosan kuormituskokeissa kuormitettavana oli Parma Oy:n vuonna 2009 valmistamia BP99 pölkkyjä. Kaikki kuormitetut pölkkyt olivat käyttämättömiä ja edustivat samoja luvussa 2.3.1 esiteltyjä valmistuseriä, joita käytettiin myös staattisissa ja dynaamisissa kuormituskokeissa.

2.3.5 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt

Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitettiin käytöstä poistettuja ratapölkkyjä rataosalta Kontiomäki-Vartius (Vartiuksen rata). Rataosalla vaihdettiin ratapölkkyjä niiden huonon kunnon vuoksi. Rataosa valmistui vuonna 1976 ja toimitetut ratapölkkyt oli valmistettu 1975. Näin ollen pölkkyt ovat alkuperäisiä rataan asennettuja, noin 35 vuotta vanhoja pölkkyjä. Tällä hetkellä Kontiomäki-Vartius välillä kulkee vain tavaraliikennettä.

Toimitetut ratapölkkyt olivat tyypiltään B75- ja BV69-pölkkyjä. B75-pölkkyt oli valmistettu jälkijännitystekniikalla ja BV69-pölkkyt esijännitystekniikalla. Toimitetut ratapölkkyt voidaan jakaa karkeasti kolmeen kuntoluokkaan: silmämääräisesti hyväkuntoiset, lievästi/kohtalaisesti vaurioituneet ja käyttökelvottomaksi vaurioituneet. Kuva 2.23 esittää käyttökelvottomaksi vaurioituneita pölkkyjä.



Kuva 2.23 Vartiuksen radalta poistettuja ratapölkkyjä.

Lievästi tai kohtalaisesti vaurioituneiden pölkkyjen vaurioina oli tyypillisesti pölkyn sivuilla ja/tai yläpinnassa pölkyn pituussuuntaiset halkeamat ja pienet betonikappaleiden lohkeamat eripuolilta pölkkyä. Lisäksi useasta B75-pölkystä oli lohjennut betonikappale jänneterästen aktiivipäästä ankkurointikappaleisiin asti (kuva 2.24). Aktiivipää on se pölkyn pää, jossa jänneterästankojen jännittäminen tapahtuu.



Kuva 2.24 B75 –pölkkyjä lohjenneena aktiivipäästään.

Käyttökelvottomaksi vaurioituneiden ratapölkkyjen vauriot olivat tyypillisesti suurehkojen betoninkappaleiden lohkeamisia joko pölkyn keskeltä tai kiskon lähetyviltä. Esimerkiksi ratapölkkyistä saattoi puuttua betoni usean kymmenen sentin matkalta pölkyn keskeltä. Pölkyn pään vauriot saattoivat olla niin pahoja, että kiskon kiinnityksen valuankkuri oli selkeästi löystynyt tai irronnut kokonaan (kuva 2.25).



Kuva 2.25 Kiskon kohdalta murtunut B75-pölkky.

2.3.6 Ratapölkkyjen halkeilurajatila ja murtorajatila

Halkeilurajatilan arvioimiseksi pitää ensin laskea ratapölkyn poikkileikkaussuureet sekä kiskon kohdalla että keskellä. Uusista ratapölkkyistä oli käytössä piirustukset mittatietoja varten. Taulukossa 2.7 on esitetty BP99 pölkyn poikkileikkaussuureet kiskon kohdalla. Vanhoista ratapölkkyistä vain osasta oli käytettävissä piirustukset mittatietoja varten. Puuttuvat mittatiedot hankittiin käsin mittaamalla TTY:lla.

Taulukko 2.7 Ratapölkyn poikkileikkaustiedot, esimerkkinä Parma BP99 kiskon kohdalla.

Korkeus	h	220	mm
Leveys ylhäällä	b	180	mm
Leveys alhaalla	a	282	mm
Etäisyys neutraaliakselilta alareuna	h_{su}	101,9	mm
Etäisyys neutraaliakselilta yläreuna	h_{so}	118,1	mm
Jäyhyysmomentti	I_c	201643619	mm ⁴
Taivutusvastus alareunan suhteen	W_u	1978746	mm ³
Taivutusvastus yläreunan suhteen	W_o	1707466	mm ³
Poikkileikkausala	A_{yht}	50820	mm ²

Halkeilurajatila laskettiin käyttämällä joko piirustuksissa esitettyä (uudet pölkyt) tai arvioitua punosten pitkän ajan vetojännitystä. Betonin vetolujuudeksi arvioitiin betoninormien mukaan $f_{ctk} = 3,07$ MPa, kun betoni on K60. Tämän mukaan laskettiin betonin taivutusvetolujuus $= 1,7 \cdot f_{ctk} = 5,2$ MPa poikkileikkauksen reunalla. Halkeama syntyy, kun betonin vetojännitys saavuttaa taivutusvetolujuuden arvon.

Taivutusmurtokestävyys laskettiin siten, että betonin puristuspinnasta kauimmaisille (uloimmille) punoksille käytettiin vetolujuutena murtolujuutta ja lähempänä puristuspintaa sijaitseville punoksille myötölujuutta.

Laskennan tulokset kiskon kohdalla ja ratapölkyn keskellä pölkkytyypeille BP99 ja B97 on esitetty taulukoissa 2.8-2.11.

Taulukko 2.8 Ensimmäistä halkeamaa vastaava taivutusmomentti, ratapölkkyt BP99 ja B97.

		BP99		B97	
		Kisko, posit	Keski, negat	Kisko, posit	Keski, negat
W taivutusvastus	mm ³	1978746	1006164	1978746	1006164
A _p punokset	mm ²	254,4	254,4	254,4	254,4
Jännevoiman loppuarvo	kN	275	275	275	275
Punosjännitys σ_{loppu}	MPa	1081	1081	1081	1081
A _{c,yhteensä} betonipoikkileikkaus	mm ²	50820	35613	50820	35613
Betonijännitys $\sigma_{c,\text{kesk}}$, punosvoimasta	MPa	5,4	7,7	5,4	7,7
Neutraaliakselin etäisyys alareunasta	mm	101,9	85,7	101,9	85,7
Keskimäär. punosten etäis. alareunasta	mm	93,5	93,5	91,3	91,3
Punosten epäkeskisyys	mm	8,4	7,8	10,6	5,6
Punosvoiman epäkeskisyyden aiheuttama jännitys reunalla	MPa	1,2	2,1	1,5	1,5
M_R halkeilu, yht.	kNm	23,3	15,2	23,9	14,6

Taulukko 2.9 Ensimmäistä halkeamaa vastaava taivutusmomentti, ratapölkkyt B63, B75 ja BV75.

		B63	B75	B63 ja B75	BV75	
		Kisko, posit	Kisko, posit	Keski, negat	Kisko, posit	Keski, negat
W taivutusvastus	mm ³	1453782	1530284	826237	1715610	964931
A _p punokset	mm ²	212	212	212	254,4	254,4
Jännevoiman loppuarvo	kN	230	230	230	275	275
Punosjännitys σ_{loppu}	MPa	1085	1085	1085	1081	1081
A _{c,yhteensä} betonipoikkileikkaus	mm ²	43313	44438	30625	49500	35000
Bet.jännitys $\sigma_{c,\text{kesk}}$, punosvoimasta	MPa	5,3	5,2	7,5	5,6	7,9
Neutraaliakselin etäis. alareunasta	mm	91,3	93,6	81,7	95,6	83,1
Keskimäär. pun. etäis. alareunasta	mm	90	90	90	85	85
Punosten epäkeskisyys	mm	1,3	3,6	8,3	10,6	1,9
Punosvoiman epäkeskisyyden aiheuttama jännitys reunalla	MPa	0,2	0,5	2,3	1,7	0,5
M_R halkeilu, yht.	kNm	15,6	16,7	12,4	21,4	13,1

Taulukko 2.10 Taivutusmurtomomentti, ratapölkkyt BP99 ja B97.

		BP99		B97	
		Kisko, posit	Keski, negat	Kisko, posit	Keski, negat
A _p yläpunokset	mm ²	169,6	169,6	169,6	169,6
A _p alapunokset	mm ²	84,8	84,8	84,8	84,8
y, purist kork	mm	51,3	44	51,3	44
d, yläpunokset	mm	97	123	99	121
d, alapunokset	mm	185	35	187	33
z, yläpunokset	mm	71,4	101,0	73,4	99,0
z, alapunokset	mm	159,4	13,0	161,4	11,0
M _{Rk} yläpunokset	kNm	19,7	31,9	20,3	31,2
M _{Rk} alapunokset	kNm	25,1	1,8	25,4	1,5
M_R murto, yht.	kNm	44,9	33,7	45,7	32,8

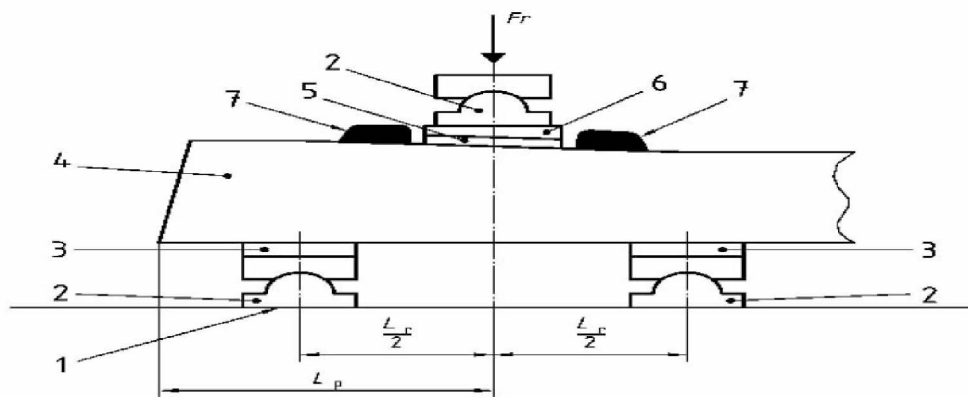
Taulukko 2.11 Taivutusmurtomomentti, ratapölkkyt B63, B75 ja BV75.

		B63	B75	B63 ja B75	BV75	
		Kisko, posit	Kisko, posit	Keski, negat	Kisko, posit	Keski, negat
A _p yläpunokset	mm ²	106	106	106	169,6	169,6
A _p alapunokset	mm ²	106	106	106	84,8	84,8
y, purist kork	mm	51	51	44	50	45
d, yläpunokset	mm	52,5	57,5	140	90	110
d, alapunokset	mm	152,5	157,5	40	165	35
z, yläpunokset	mm	27,0	32,0	118,0	65,0	87,5
z, alapunokset	mm	127,0	132,0	18,0	140,0	12,5
M _{Rk} yläpunokset	kNm	4,7	5,5	23,3	18,0	27,6
M _{Rk} alapunokset	kNm	25,0	26,0	3,1	22,1	1,7
M _R murto, yht.	kNm	29,7	31,6	26,4	40,1	29,3

2.4 Koejärjestelyt

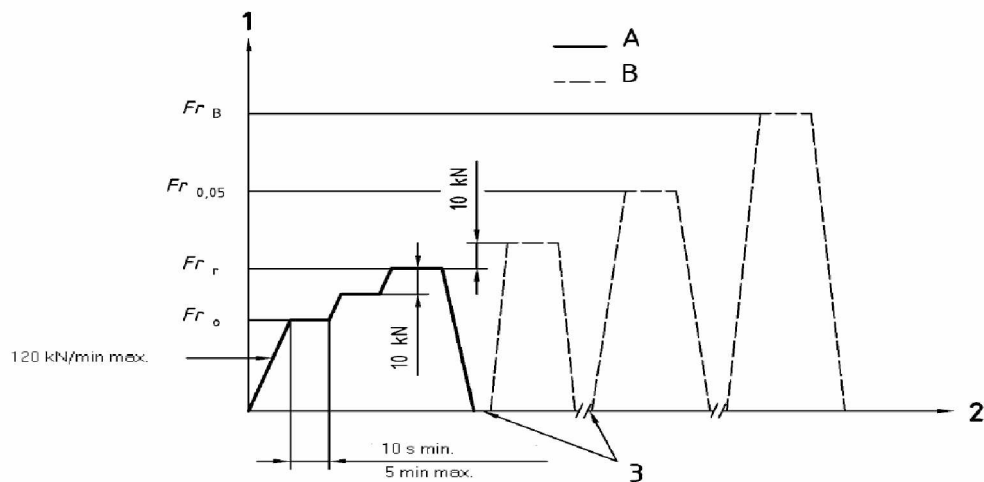
2.4.1 Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn pään staattisia kuormituskokeita tehtiin yhteensä 14 kappaletta. Kokeet tehtiin standardia SFS-EN 13230-2 noudattaen. Tukijärjestelyt olivat seuraavan kuvan 2.26 mukaiset tukien keskilinjan välisen etäisyyden ollessa 600 mm. Tuet olivat 100 mm levyiset. Ratapölkyn alapuolella sijaitsevien tukien ja ratapölkyn välissä oli standardin määräämät 15 mm paksuiset kumilevyt. Kumi oli kovuudeltaan Shore A65. Standardista poiketen kumilevyt olivat 110-120 mm levyiset standardin ohjeistaman 100 mm sijaan. Tällä pystyttiin eliminoimaan kuormituksen aikana tapahtuva kumilevyn siirtyminen pois pölkyn ja tuen välistä.



Kuva 2.26 Ratapölkyn pään kuormituskokeissa käytetty tuenta- ja kuormitusjärjestely (SFS-EN 13230-2:2009). (Kuvassa: 1. Kiinteä tuki, 2. Nivelletuki, 3. Kimmoisa kumilevy, 4. Ratapölkky, 5. Välilevy, mikä oli nykyään hankittavissa ratapölkkyissä oleva välilevy, 6. Viistetty teräslevy, 7. Sivusuuntainen tuki, mikä oli pölkkyissä oleva kiskonkiinnitysjärjestelmä.)

Ratapölkkyjä kuormitettaessa pyrittiin noudattamaan standardissa määritettyä kuormituskäyrää. Kuormituskäyrä on esitetty kuvassa 2.27. Kuormituslaitteistosta johtuen yhdellä hydraulisynterillä kuormitettaessa voimat nousivat sallittua 120 kN/min kuormitusnopeutta nopeammin aina noin 90 kN tasolle asti ja kolmella hydraulisynterillä kuormitettaessa noin 220 kN tasolle asti. Kyseisten kuormitus-tasojen jälkeen voimien nousunopeus oli standardin määräämä 120 kN/min. Sama tilanne toistui voimia pienennettäessä. Kuormien nosto- ja laskunopeuksista johtuen ratapölkkyjen kuormittaminen jouduttiin tekemään siten, että aluksi kuormittaminen aloitettiin yhtä hydraulisynteriä käyttäen. Kun kuormitus oli saavuttanut 300 kN kuormitusportaan, siirryttiin käyttämään kaikkia kolmea hydraulisynteriä. Voimien nosto kuormitusportaalta toiselle pyrittiin pitämään standardin mukaisesti 10 kN suuruisena. Käytännössä hydraulikoneikon paineensäädöllä voiman nosto tavoitearvoon kyettiin toteuttamaan noin ± 4 kN tarkkuudella.



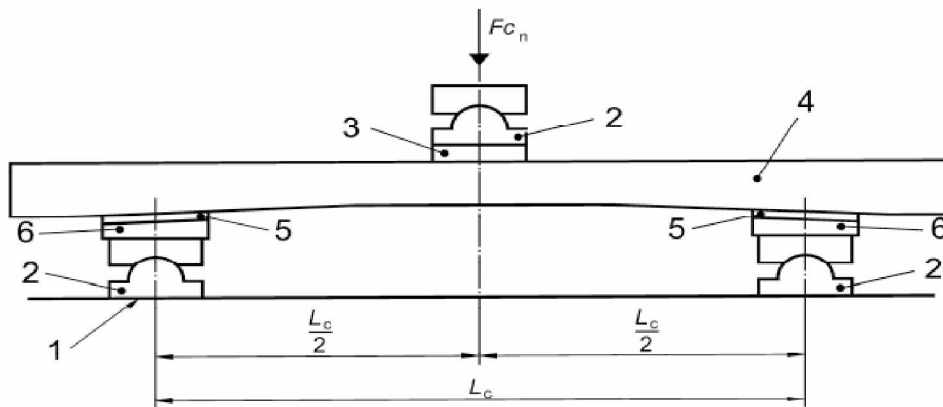
Kuva 2.27 Ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa noudatettu kuormituskäyrä (SFS-EN 13230-2:2009). Kuvassa Fr_r on kuormitustaso, jolla syntyy ensimmäinen halkeama.

Kuormituskokeissa halkeamien mittausta tehtiin standardin SFS-EN 13230-1 mukaisesti noin 15 mm pölkyn alalaidasta. Käytöstä poistettujen ratapölkkyjen kohdalla halkeamaleveyden mittausta saatettiin joutua tekemään hieman standardin määräämää 15 mm ylemmää. Syynä tähän oli käytöstä poistetuista ratapölkkyistä lohjenneet betonikappaleet. Halkeama saattoi syntyä lohkeaman kohdalle, jolloin luotettava halkeamaleveyden mittausta oli mahdotonta lohkeaman kohdalla. Tällöin halkeaman leveys jouduttiin mittaamaan hieman korkeammalta pölkyn kyljestä. Tällä ei ollut kuitenkaan oleellista merkitystä mitattuun halkeamaleveyteen. Pölkyn pään kuormituskokeissa pysyvän halkeaman leveys mitattiin kuormitusportaiden välissä pölkyn ollessa kuormittamattomana.

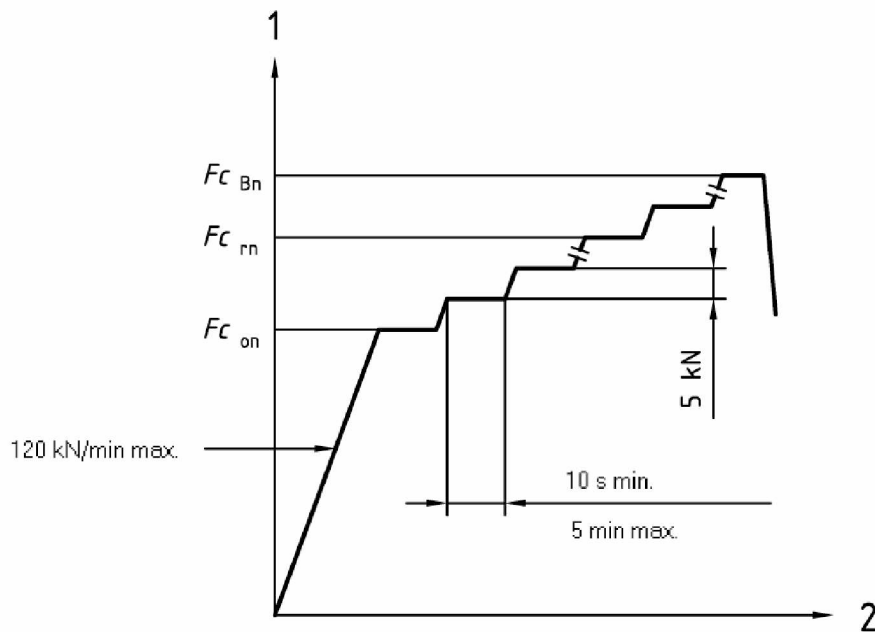
2.4.2 Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan staattisia kuormituskokeita tehtiin 14 kappaletta. Kokeiden aikana jouduttiin poikkeamaan standardin SFS-EN 13230-2 määrittämästä kuormituskäyrästä venymäsilmuton irrottamisen ja suuremman hydraulisylinterin kiinnittämisen yhteydessä. Tuolloin voimat jouduttiin laskemaan toisin kuin standardi ohjeistaa.

Kuvassa 2.28 esitettävässä pölkyn keskiosan kuormituskokeen tuennassa tukiväli oli 1600 mm. Käytetyt tuet olivat samoja kuin pölkyn pään staattisessa kuormituksessa. Kuormat nostettiin aluksi keskiosan vertailukoekuormaan (kuva 2.29: F_{con}), jonka jälkeen kuormia nostettiin 5 kN portaissa. Pienemmän voimansaantitarpeen johdosta ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa pystyttiin käyttämään pienempiä hydraulisylintereitä, kuten kappaleessa 4.3 on kerrottu. Tällöin hydraulikoneikon paineen säädön tarkkuus aiheutti ainoastaan noin $\pm 0,5$ kN virheen tavoitekuormaan.



Kuva 2.28 Ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen käytetyt tuenta- ja kuormitusjärjestely (SFS-EN 13230-2:2009). (Kuvassa: 1. Kiinteä tuki, 2. Niveltuki, 3. Kimmoisa kumilevy, 4. Ratapölkky, 5. Välilevy, mikä oli nykyään hankittavissa ratapölkkyissä oleva välilevy, 6. Viistetty teräslevy.)



Kuva 2.29 Kuormituskäyrä ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa (SFS-EN 13230 2009). Kuvassa $F_{c_{rn}}$ on kuormitustaso, jolla syntyy ensimmäinen halkeama.

2.4.3 Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe

Ratapölkyn pään dynaamisia kuormituskokeita tehtiin neljä kappaletta. Kuormituskokeissa jouduttiin poikkeamaan standardista SFS-EN 13230-2 kuormituksen ylitettyä 310 kN. Tuolloin siirryttiin käyttämään kaikkia kolmea hydraulisylinteriä, jolloin standardin määrittämä viiden minuutin aika kuormitusportaiden välissä ylittyi.

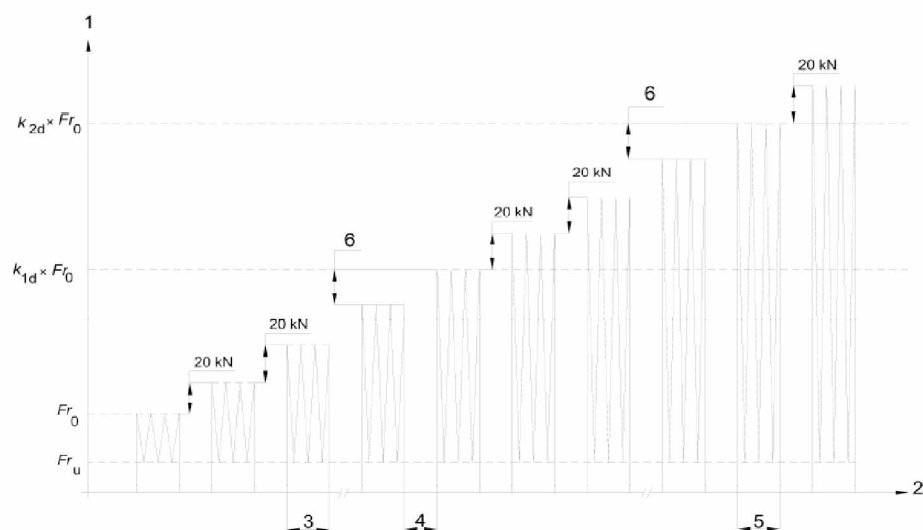
Tukien sijainti oli sama kuin pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa (kuva 2.26). Lisäksi ratapölkkyyn lisättiin kuvassa 2.30 näkyvät sivu- ja pituussuuntaiset tuet, jotka estivät ratapölkyn sivu- ja pituussuuntaista liikettä dynaamisen kuormituskokeen

aikana. Tuet oli kiinnitetty lattiaan ja kuormituskehään, ja ratapölkkyyn kiinnitetyt aisat oli nivelöity molemmista päistä.

Kuormituskokeiden aikana pohjavoimana, eli voimana jonka alle kuormat eivät laske sykliä aikana, käytettiin 50 kN (kuva 2.31: F_{ru}) ja ensimmäinen kuormitusporras oli vertailukoekuorman F_{r0} suuruinen. Kuormitusportaan nosto oli 20 kN ja jokaisella kuormitusportaalla kuormituspulssia toistettiin 5000 kertaa (kuva 2.31). Kuormituskokeissa käytetty kuormitustaajuus oli 2 Hz, jolloin yksittäisen kuormitusportaan kesto oli halkeaman mittausta huomioiden hieman alle 50 minuuttia.



Kuva 2.30 Dynaamisissa kuormituskokeissa käytetyt pituus ja sivusuuntaiset tuet.



Kuva 2.31 Kuormituskäyrä ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa (SFS-EN 13230 2009). (Kuvassa: 1. Kuorma, 2. Aika, 3. 5000 kuormitus-sykliä, 4. Maksimi aika kuormitusportaiden välillä 5 min, 5. Taajuus 2-5 Hz, 6. Kuormitusportaat ennen $k_{1d} \cdot F_{r0}$ ja $k_{2d} \cdot F_{r0}$ pienempiä kuin 20 kN.)

2.4.4 Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisia kuormituskokeita tehtiin neljä kappaletta. Kuormituskoe ei sisältynyt standardiin SFS-EN 13230-2, mutta sen katsottiin antavan oleellista tietoa ratapölkyn keskiosan käyttäytymisestä dynaamisen kuormituksen alaisena. Kuormituskokeessa käytettiin samanlaista tuentajärjestelyä kuin ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa tukivälin ollessa 1600 mm (kuva 2.28). Kokeissa käytetty kuormituskäyrä pohjautui kuvassa 2.31 esittävään pölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa käytettyyn kuormituskäyrään. Kuormituskokeiden aikana pohjavoimana käytettiin 15 kN ja ensimmäinen kuormitusporras oli pölkyn keskiosan vertailukoekuorman suuruinen. Kuten ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa jokaisella kuormitusportaalla kuormituspulssia toistettiin 5000 kertaa kuormitustaajuuden ollessa 2 Hz. Pienemmistä kuormista johtuen kuormitusportaan nosto oli 10 kN.

2.4.5 Vihannin raiteessa halkeilleet ratapölkkyt

Kaikki Vihannista toimitetuille ratapölkkyille tehdyt kuormituskokeet tehtiin ratapölkyn keskiosalle, ja ne olivat staattisia, missä kuormat nostettiin hitaasti aina murtokuormaan asti. Kuormien nostonopeus oli noin 1 kN/15 s. Kuormitettava ratapölkky oli tuettu kiskon lepopintojen kohdalta tukivälin ollessa 1600 mm. Kuormitusvoiman lisäksi kokeen aikana mitattiin ratapölkyn pystysuuntaisia siirtymiä kuudella siirtymäanturilla (kuva 2.11). Pystysuuntaisten siirtymien avulla voitiin määrittää kuorman aiheuttama taipuma ratapölkkyssä ja tätä kautta arvioida pölkyn rakenteellista jäykkyyttä. Mitattujen pystysuuntaisten siirtymien avulla määritetty taipuma ei ole maksimi taipuma, mutta ero maksimi taipumaan on vähäinen.

2.4.6 Väsytytkuormituskokeet

Väsytytkuormituskokeissa jokaiselle koepölkylle (ks. kohta 2.3.4) tehtiin 200000 syklin kuormitus vakiokuormalla, minkä jälkeen pölkkyt kuormitettiin staattisesti murtoon. Pölkyn pään kuormituskokeissa pohjavoimana, eli voimana minkä alle kuormat eivät syklien aikana laskeneet, oli 50 kN ja pölkyn keskiosan kokeissa 15 kN. Kuormitustaajuutena käytettiin 2 Hz, paitsi kahdessa pölkyn pään kuormituskokeissa, joissa kuormitusvoimana oli 100 kN. Tällöin kuormitustaajuutena oli 3 Hz.

Väsytytkuormituskokeista kolme tehtiin ratapölkyn keskiosalle ja seitsemän ratapölkyn päälle. Voimien lisäksi pölkyn pään ja keskiosan kuormituksissa mitattiin myös pölkyn pystysuuntaisia siirtymiä kuudella siirtymäanturilla. Siirtymäanturit oli sijoitettu kappaleessa 2.1.3.6 (kuva 2.11 ja kuva 2.12) esiteltyihin kohtiin.

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa tukiväliksi valittiin 800 mm. Maailmalla useimmiten pölkyn pään kuormituskokeissa käytettävä tukiväli on 600 mm. Testattavien ratapölkkyjen ulkomitoista johtuen päädyttiin kuitenkin käyttämään pidempää tukiväliä. Myös Gustavsson (2002) käytti betoniratapölkkyjen kuormituskokeissa 800 mm tukiväliä. Pidemmällä tukivälillä kasvatettiin tukivälin ja kuormituspisteen kohdalla olevan pölkyn korkeuden suhdetta. Pidemmän tukivälin valinnan tarkoituksena oli, että kuormitettava rakenne toimisi paremmin yksiaukkoisena palkkina eikä seinämäisenä palkkina. Katkaisun jälkeen pölkyn keskiosan puoleinen pää jäi vielä noin 400 mm yli alapuolisen tuen, joten punosten tartuntapituus oli varmasti riittävä.

2.4.7 Vartiuksen radasta poistetut pölkyt

Rataosalta Kontiomäki-Vartius toimitetuille ratapölkkyille tehtiin staattisia kuormituskokeita. Kuormituskokeissa tukina käytettiin standardin EN-13230 mukaisia tukia ja kokeissa voimaa kasvatettiin hitaasti aina murtoon saakka. Voiman lisäksi kokeissa mitattiin pölkyn taipumaa ja tämän avulla pystyttiin arvioimaan pölkyn jäykkyyttä ja mahdollisten vaurioiden vaikutusta jäykkyyteen. Kuormituskokeita tehtiin yhteensä kymmenen kappaletta, joista seitsemän pölkyn päälle ja kolme pölkyn keskiosalle. Pölkyn pään kuormituskokeissa käytettiin 600 mm tukiväliä ja pölkyn keskiosan kuormituskokeissa tukiväli oli 1600 mm. Pölkyn pään kuormituskokeissa jouduttiin käyttämään 600 mm tukiväliä väsytytkuormituskokeissa käytetyn 800 mm tukivälin sijaan. Syynä tähän oli B75 ja BV69 pölkkyjen pituus, mikä on 2500 mm. Mikäli olisi käytetty 800 mm tukiväliä olisi pölkyn pää ollut alapuolisen tuen ulomman reunan kohdalla. Ongelmia muodostuisi erityisesti B75 pölkkyjä kuormitettaessa, sillä B75 pölkkyissä jänneterästen ankkurointikappaleet ovat joitain senttejä pölkyn päästä. Pölkkyjä kuormitettaessa pölkyn päästä todennäköisesti lohkeaisi betonin kappale ankkurointikappaleiden linjalta, jolloin ratapölkky tippuisi tuelta.

Toimitetuista ratapölkkyistä porattiin myös näytteitä rapautumistutkimuksia varten. Näytesarjat otettiin yhteensä kahdeksasta eri pölkystä, mitkä sisälsivät silmämääräisesti hyväkuntoisia, lievästi vaurioituneita ja vaurioituneita pölkkyjä.

2.5 Betoniratapölkyn pään kestävyys

2.5.1 Staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn pään kuormituskokeita tehtiin yhteensä neljä kappaletta käyttämättömille ratapölkkyille ja kymmenen kappaletta käytöstä poistetuille ratapölkkyille. Käytöstä poistettujen ratapölkkyjen kunto oli kokonaisuudessaan hyvä. Ratapölkkyjen kyljissä oli havaittavissa yksittäisiä pituussuuntaisia säröjä, joiden pituus oli 50-300 mm ja joistakin ratapölkkyistä oli lohjennut pienehköjä betoninkappaleita. Ainoastaan kuvissa 2.32 ja 2.33 esitettävä B63-ratapölkky oli silmämääräisesti arvioiden heikkokuntoinen. Ratapölkkyssä oli havaittavissa selkeää rapautumista ja leveydeltään 0,08-1,2 mm pituussuuntaisia halkeamia. Halkeamien pituus vaihteli välillä 50-700 mm.



Kuva 2.32 Halkeamia B63-ratapölkyn kyljessä.



Kuva 2.33 Halkeamia B63-ratapölkyn päässä.

Jokaisessa kuormitetussa käytöstä poistetussa ratapölkkyssä oli kiskon lepopinnan kohdalla jo olemassa ollut pystysuuntainen halkeama. Halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja ne pystyttiin havaitsemaan pölkyn sivuilta usein vasta kuormien noston yhteydessä. Halkeama kuitenkin erottui monesti pölkyn alapinnasta kuvan 2.34 mukaisesti. Kuvan mukainen halkeama ulottui aina läpi pölkyn ja sen pituus pölkyn sivuilla vaihteli noin 30 mm:stä yli 100 mm:iin.



Kuva 2.34 Ratapölkkyssä ollut pystysuuntainen halkeama, joka pystyttiin havaitsemaan pölkyn alapinnasta.

Standardin SFS-EN 13230-2 mukaisissa ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa saadut koetulokset on esitetty taulukossa 2.12. Taulukossa on esitetty kuormitus, jolla ensimmäinen halkeama on havaittu visuaalisesti, kuormitus, jonka jälkeen pysyvä halkeama on ollut leveydeltään 0,05 mm ja murtokuorma.

Standardin SFS-EN 13230-2 asettamien kriteerien mukaisesti ratapölkyn on kestävä vertailukoekuorma halkeamatta. Akselipainon ollessa 215 kN ja junan nopeuden ollessa yli 200 km/h vertailukoekuorma on noin 128 kN. Taulukosta voidaan havaita,

että B97 ja BP99 täyttivät kyseisen kriteerin hyvin. Standardi asettaa myös kriteerin pysyvälle, leveydeltään 0,05 mm halkeamalle. Kyseinen kriteeri on 230 kN. Taulukosta voidaan havaita BV75-, B97 ja BP99-ratapölkkyjen täyttävän kriteerin hyvin. B75-ratapölkkyt täyttivät kriteerin niukasti ja huonokuntoinen B63-ratapölkky ei täyttänyt kriteeriä. Lisäksi standardi määrittää kriteerin suurimmalle kuormalle minkä ratapölkyn on pystyttävä vastaanottamaan. Kyseinen kriteeri on 320 kN. Kriteeri täyttyy selkeästi eri ratapölkkytyypeillä lukuun ottamatta huonokuntoista B63-ratapölkkyä.

Taulukko 2.12 Betoniratapölkyn pään staattisen kuormituskokeen tulokset. BV75- ratapölkky oli valmistettu 1977, B75-ratapölkky 1976 ja B63-ratapölkky 1974.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 128 kN)	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN] (Kriteeri > 230 kN *)	Murtokuorma [kN] (Kriteeri > 320 kN)
BV75 (koe 3)	-	450	530
BV75 (koe 6)	-	430	548
BV75 (koe 7)	-	420	484
BV75 (koe 8)	-	400	465
BV75 (koe 9)	-	410	477
BV75 (koe 10)	-	370	465
BV75 (koe 11)	-	460	503
B97 - uusi (koe 2)	170	310	565
B97 - uusi (koe 12)	180	370	511
BP99 - uusi (koe 4)	180	340	509
BP99 -uusi (koe	190	400	480
B63 (koe 1) (huonokuntoinen)	-	200	300
B75 (koe 14) (hyväkuntoinen)	-	250	387
B75 (koe 5) (hyväkuntoinen)	-	250	397

* Kriteeri on määritetty standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti (ks. luku 2.2.1) ja vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

Jälkijännitettyjen B63- ja B75-ratapölkkyjen käyttäytyminen erosi kuormitettaessa muista ratapölkkytyypeistä. B63- ja B75-ratapölkkyt käyttäytyivät siten, että halkeamaleveydet kasvoivat tasaisesti noin 300 kN kuormitukseen asti. Tämän jälkeen halkeamaleveys kasvoi erittäin nopeasti. Muissa testatuissa ratapölkkytyypeissä halkeamaleveydet kasvoivat tasaisesti lähes koko kuormituskokeen ajan ja murtokuormaa lähestyttäessä halkeamaleveydet olivat B63- ja B75-pölkkyihin verrattuna huomattavasti pienempiä. Kuvassa 2.35 on esitetty B75-ratapölkky kuormitettuna kuorman ollessa 360 kN. Kuormien poistuttua halkeaman leveys oli noin kaksi millimetriä.

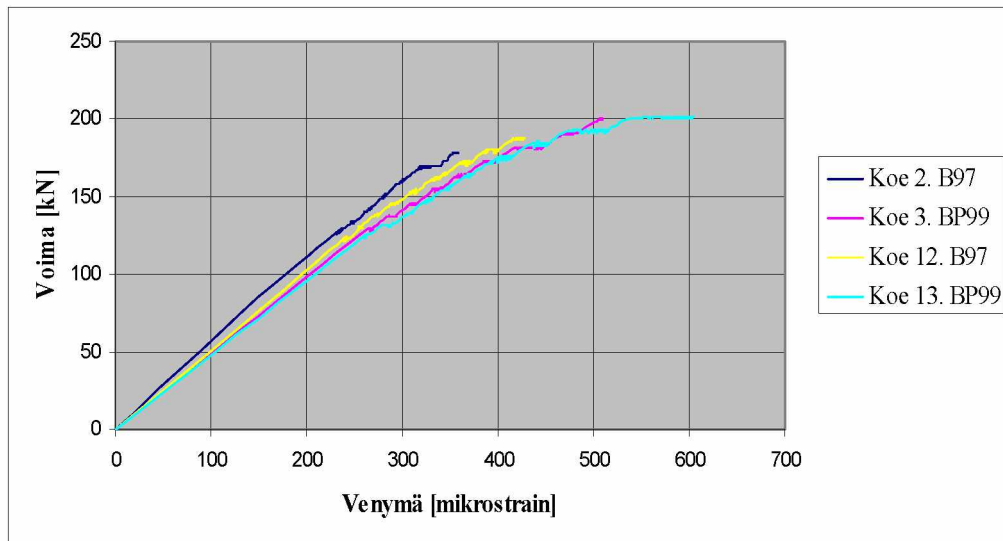


Kuva 2.35 B75-ratapölkky kuormitettuna 360 kN voimalla pölkyn pään staattisessa kuormituskokeessa.

Valokuvat kuormitetuista ratapölkkyistä ja tarkemmat kuormituksen aikaiset havainnot on esitetty Rantalan (2010) diplomityössä. Kuvista voidaan huomata, että ratapölkyn pään kuormituksessa murtotapana oli useimmiten taivutusmurto tai taivutusleikkausmurto, jolloin jänneteräkset eivät lopulta kestäneet niihin kohdistuvia veto-rasituksia vaan menivät poikki. Poikkeuksena oli huonokuntoinen B63-ratapölkky, jossa murtotapana oli taivutus-puristusmurto. BV75-ratapölkkyissä huomioitavaa on se, että murto tapahtui aina ennen kuormitusta olemassa olleen halkeaman kohdalta.

Staattisissa kuormituskokeissa ei silmämääräisesti havaittu punosten liukumia yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Poikkeuksena oli BV75, missä havaittiin 0,05 mm pysyvä halkeama 370 kN kuormitustasolla (koe 10). Liukuma selittää pysyvän halkeama-levyden kasvun muita vastaavan tyyppisiä pölkkyjä aikaisemmin.

Ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa mitatut venymät on esitetty kuvassa 2.36. B97-ratapölkkyllä ensimmäinen halkeama havaittiin 170 kN kuormitustasolla kokeessa 2 ja 180 kN kuormitustasolla kokeessa 12. Tuolloin mitatut venymät olivat noin 350-400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Vastaavasti BP99-ratapölkkyillä ensimmäinen halkeama havaittiin 180 kN kuormitustasolla kokeessa 3 ja 190 kN kuormitustasolla kokeessa 13. Tuolloin venymät olivat noin 420-470 $\mu\text{m}/\text{m}$. Mikäli halkeama muodostui anturin mittausalueelle alkoivat mitatut venymät kasvaa huomattavasti, kuten kokeen 13 tuloksesta havaitaan.



Kuva 2.36 Venymämittaustuloksia käyttämättömillä ratapölkkytyypeillä ratapölkyn pään staattisessa kuormituskokeessa.

2.5.2 Dynaaminen kuormituskoe

Dynaamisia ratapölkyn pään kuormituskokeita tehtiin kahdelle käytöstä poistetulle ja kahdelle käyttämättömälle ratapölkylle. Käytöstä poistetut ratapölkkyt olivat kunnoltaan silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia. Taulukko 2.13 esittää ratapölkyn pään dynaamisten kuormituskokeiden tulokset.

Taulukko 2.13 Betoniratapölkyn pään dynaamisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 128 kN *)	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN] (Kriteeri > 192 kN *)	Murtokuorma ja syklit [kN] (Kriteeri > 282 kN *)
BV75 (koe 16)	-	230	310 (423 sykliä)
BV75 (koe 17)	-	270	390 (4042 sykliä)
B97 (koe 15)	190	290	430 (2856 sykliä)
BP99 (koe 18)	210	290	390 (4803 sykliä)

* Kriteeri on määritetty standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti (ks. luku 2.2.1) ja vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

B97- ja BP99-ratapölkkyissä ensimmäinen halkeama havaittiin 190 kN ja 210 kN kuormitustasolla, kuten taulukossa 2.13 on esitetty. Ensimmäiset halkeamat havaittiin hieman suuremmalla kuormitustasolla verrattuna pölkyn pään staattisiin kuormituskokeisiin. Tämä selittyy kuitenkin sillä, että dynaamisissa kuormituskokeissa kuormitusportaiden väli on 20 kN kun staattisissa kokeissa kuormia nostettiin 10 kN portaisissa. Tällöin staattisissa kokeissa halkeaman syntymiseen vaadittu kuormitustaso oli lähempänä todellista halkeaman syntyyn vaadittavaa kuormitustasoa.

Dynaamisissa kuormituskokeissa standardin SFS-EN 13230-2 asettama kriteeri ensimmäisen halkeaman osalta on sama kuin staattisissa kuormituskokeissa. Kyseinen

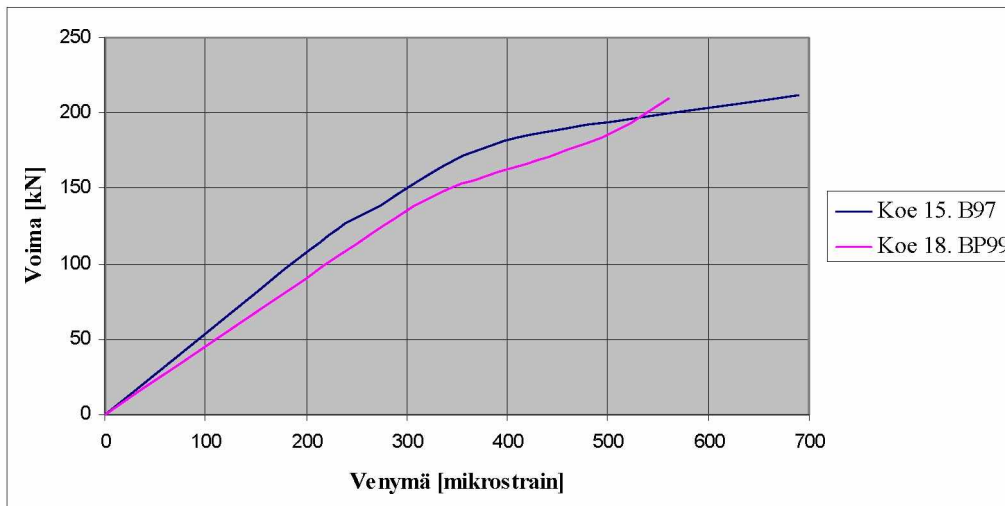
128 kN kriteeri täyttyy Bg7- ja BP99-pölkkyillä selvästi. Käytöstä poistetuissa pölkkyissä oli halkeama kiskon lepopinnan kohdalla, joten ensimmäistä halkeamaa vastaavaa kriteeriä ei pystytty tarkastelemaan näiden pölkkyjen kuormituskokeissa.

Pysyvän 0,05 mm halkeaman kriteeri on dynaamisessa kuormituskokeessa 192 kN, joten kaikki testatut ratapölkkyt täyttivät sen. Vertailtaessa käyttämättömiä ja käytöstä poistettuja ratapölkkyjä voidaan kuitenkin huomata se, että BV75-pölkkyissä 0,05 mm pysyvä halkeama muodostui pienemmällä kuormitustasolla verrattuna Bg7- ja BP99-pölkkyihin. Staattisissa kuormituskokeissa tilanne oli päinvastainen.

Kaikki kuormitetut pölkkyt täyttivät myös suurimmalle kuormalle asetetun kriteerin, mikä on 282 kN. Toinen BV75-ratapölkky täytti kriteerin selkeästi, mutta toinen vain niukasti. Mahdollisena tekijänä tähän on pölkkyissä jo olemassa olleiden halkeamien pituus. 310 kN kuormalla murtuneessa ratapölkkyssä ennen kuormittamista olleen halkeaman pituus pölkyn sivuilla oli noin 110 mm, kun taas 390 kN kuormalla murtuneessa ratapölkkyssä ennen kuormittamista olleen halkeaman pituus pölkyn sivuilla oli vain 50 mm.

Kuvassa 2.37 on esitetty ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa mitatut venymät. Bg7-ratapölkkyssä ensimmäinen halkeama havaittiin 190 kN kuormitustasolla venymän ollessa tuolloin noin 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Vastaavasti BP99-ratapölkkyssä ensimmäinen halkeama havaittiin vasta 210 kN kuormitustasolla. Tuolloin pölkystä mitatut venymät olivat noin 500 $\mu\text{m}/\text{m}$. Dynaamisessa kokeessa mitatut venymät ovat näin ollen samansuuruisia verrattuna staattisissa kuormituskokeissa mitattuihin venymiin.

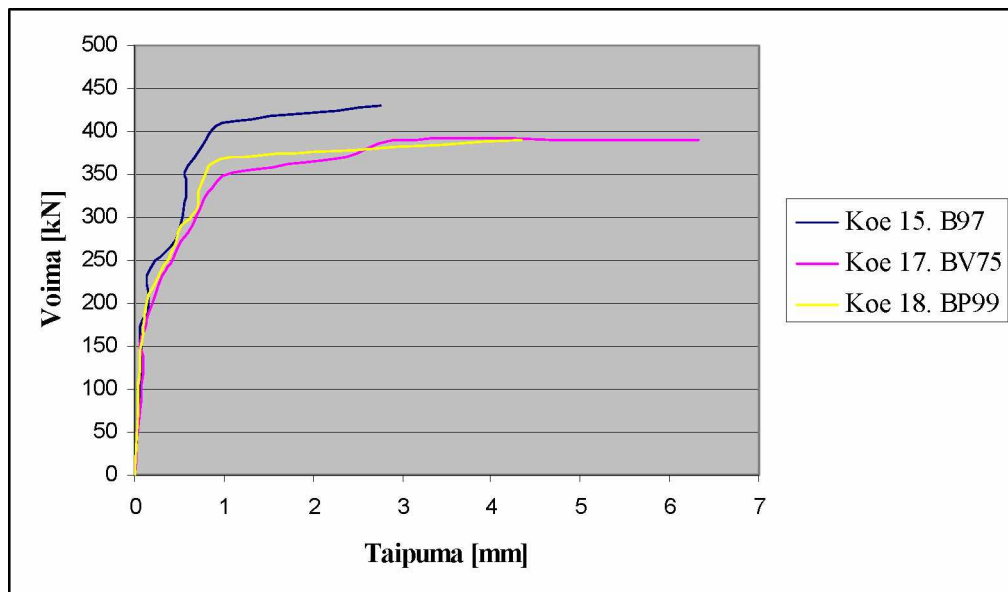
Venymämittaustuloksissa on huomionarvoista, että ensimmäinen halkeama niin staattisissa kuin dynaamisissa kuormituskokeissa muodostui Bg7-ratapölkkyyn hieinan pienemmällä venymätasolla verrattuna BP99-ratapölkkyyn.



Kuva 2.37 Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa.

Ratapölkyn pään kuormituskokeissa taipumien mittaaminen muodostui ongelmalliseksi. Toisin kuin pölkyn keskiosan kuormituskokeissa pölkky ei ennen kuormien nostoa sijainnut tasapainossa pölkyn alapuolisten tukien päällä. Ratapölkkyä ei myöskään voitu tukea vaakatasoon ennen kuormien nostoa, sillä pölkyn alapuolisten tukien ja pölkyn välissä olevat kumit alkoivat painua heti kuormitusta nostettaessa. Tämä olisi aiheuttanut kuorman jakautumisen kolmen tuen kesken, jolloin pölkkyyn muodostu-

vat rasitukset olisivat eronneet merkittävästi tavoitellusta. Tästä johtuen kuormien noston yhteydessä ratapölkky saattoi liikkua, mikä aiheutti virhettä siirtymiin. Lisäksi ratapölkyn alapinta on hyvin epätasainen mikä aiheuttaa ratapölkyn kallistumista ja kiertymistä kuormituksen aikana. Käytetty anturisijoittelu ei pystynyt täysin poistamaan kiertymien ja kallistuman aiheuttamaa virhettä mitattuihin taipumiin. Lisäksi siirtymäanturisignaalien vahvistukseen käytetty vahvistin aiheutti taustakohinaa. Kohina saattoi aiheuttaa enimmillään 0,1-0,2 mm heiton yksittäiseen siirtymämittaukseen. Edellä mainitut virhetekijät ja ratapölkyn päähän muodostuvat erittäin pienet siirtymät aiheuttivat suuren epäluotettavuustekijän kuormituskokeiden siirtymämittauksiin. Hyvänä esimerkkinä tästä on kuvassa 2.38 esitettävät pölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat.



Kuva 2.38 Ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa mitatut taipumat.

Kuvassa esitetyistä ratapölkyn taipumista voidaan kuitenkin havaita, että ratapölkyn taipumat kasvoivat erittäin hitaasti aina noin 1 mm:iin asti. Tämän jälkeen taipumat kasvoivat erittäin voimakkaasti ollen ennen murtoa 3-6 mm pölkkytyypistä riippuen. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ratapölkkyistä mitatut taipumat olivat ainoastaan noin 0,15-0,2 mm.

2.5.3 Väsytyskuormituskokeet

Betoniratapölkyn pään väsytyskuormituskokeita (ks. luku 2.4.6) tehtiin kahdeksan kappaletta. Taulukko 2.14 esittää tehdyt pölkyn pään väsytyskuormituskokeet ja väsytyskuormituskokeiden jälkeen tehdyistä staattisista kuormituskokeista saadut murtokuormat. Kokeissa 8 ja 9 kuormitustasona oli 100 kN, mikä on halkeamarajatilaa pienempi kuorma. Erona kuormitetuissa pölkkyissä oli se, että kokeen 8 pölkkyyn oli aiheutettu halkeama ennen väsytyskuormituskokeetta. Kokeen 10 pölkky kuormitettiin vain staattisesti vertailua varten. Muut kuormat on valittu siten, että väsytyskuormituskokeiden aikaansaama väsyminen ja pienin väsymistä aiheuttava kuormitustaso havaittaisiin.

Kokeiden 14 ja 12 murtokuormista voidaan havaita, että murtokuormat olivat hieman pienempiä verrattuna muihin kokeisiin. Erityisesti kokeen 12 pienentynyt murtokuorma saattaa viitata väsymiseen. Hieman pienemmät murtokuormat kokeissa 12 ja 14

voivat kuitenkin osittain selittyä myös pölkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Sen sijaan 195 kN, 220 kN ja 230 kN kuormitustaso väsytytkuormituskokeessa sai aikaan merkittävää väsymistä, sillä kokeessa 16 (195 kN) pölky murtui 150000 syklin kohdalla, kokeessa 11 (220 kN) pölky murtui 60000 syklin kohdalla ja kokeessa 15 (230 kN) 37000 syklin kohdalla. Ainoa selkeästi muista poikkeava tulos on 190 kN kuormitustasolla tehty koe 13. Pölky ei murtunut syklien aikana ja staattisessa kuormituskokeessa murtokuormaksi saatiin käytännössä sama tulos verrattuna kokeiden 8, 9 ja 10 murtokuormiin. Saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa, että kokeen 13 pölky on ollut poikkeuksellisen kestävä ja näin ollen väsymistä on voinut tapahtua jo 150 kN kuormitustasolla.

Taulukko 2.14 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeet ja staattisista kokeista saadut murtokuormat.

Kokeen numero	Väsytytkuorma	Murtokuorma [kN]
9	B97 (Väsytytkuorma 100 kN)	340
8	B97 (Väsytytkuorma 100 kN, halkaistu)	341
10	B97 (Kuormittamaton)	342
14	B97 (Väsytytkuorma 150 kN)	332
12	B97 (Väsytytkuorma 170 kN)	315
13	B97 (Väsytytkuorma 190 kN)	342
16	B97 (Väsytytkuorma 195 kN)	Murtui 150000 syklin jälkeen
11	B97 (Väsytytkuorma 220kN)	Murtui 60000 syklin jälkeen
15	B97 (Väsytytkuorma 230kN)	Murtui 37000 syklin jälkeen

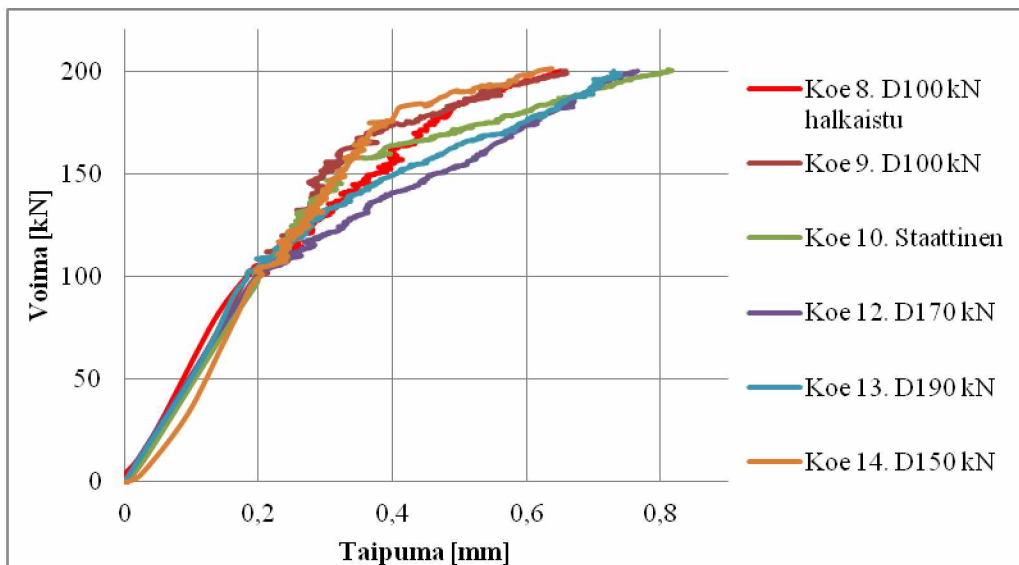
Väsytytkuormituskokeiden aikana murtuneista pölkyistä katkesivat punokset alimmasta punosrivistä alkaen. Vasta staattisissa kuormituskokeissa murtuneet pölkyt halkesivat pölkyn pituussuuntaisesti toista punosriviä pitkin, kuten kuva 2.39 esittää. Näin ollen voidaan esittää varovainen arvio siitä, että pölkyn väsymisen kannalta merkityksellisempää on jänneterästen väsyminen kuin betonin väsyminen.



Kuva 2.39 Väsytytkuormituskokeiden jälkeisessä staattisessa kuormituskokeessa pituussuuntaisesti haljennut pölkky.

Väsytytkuormituskokeissa viisi pölkkyä ei murtunut 200000 syklin aikana. Näille pölkyille tehtiin staattiset kuormituskokeet, missä ne kuormitettiin hitaasti voimia nostamalla murtoon saakka. Väsytytkuormituskokeiden pölkkyjen lisäksi staattisesti kuormitettiin vertailukappaleeksi väsytytkuormittamaton pölkky (koe 10). Kuva 2.40 esittää staattisissa kokeissa kuormitettujen pölkkyjen voima-taipuma kuvaajat 200 kN kuormitustasolle asti. Kuvaajasta voidaan havaita, että kuormituksen kokeiden 8, 12 ja 13 pölkkyjen taipumat olivat hieman suurempia verrattuna muiden pölkkyjen taipumiin. Tulos on odotettu, sillä kokeiden 12 ja 13 pölkkyissä oli väsytytkuormituskokeiden aikana syntyneet halkeamat ja kokeen 8 pölkky oli kuormitettu staattisesti ennen väsytytkuormituskokeita noin 180 kN kuormitustasolle. Tuolloin pölkkyyn oli syntynyt kaksi halkeamaa, joiden pituudet olivat noin 90 mm ja 100 mm. Halkeamat selittävät pölkkyjen pienemmän jäykkyyden verrattuna muihin pölkkyihin. Ennen staattista kuormitusta halkeaman sisältäneiden pölkkyjen taipumat olivat 150 kN kuormitustasolla noin 0,4-0,5 mm, kun taas muissa pölkkyissä taipumat olivat noin 0,3 mm.

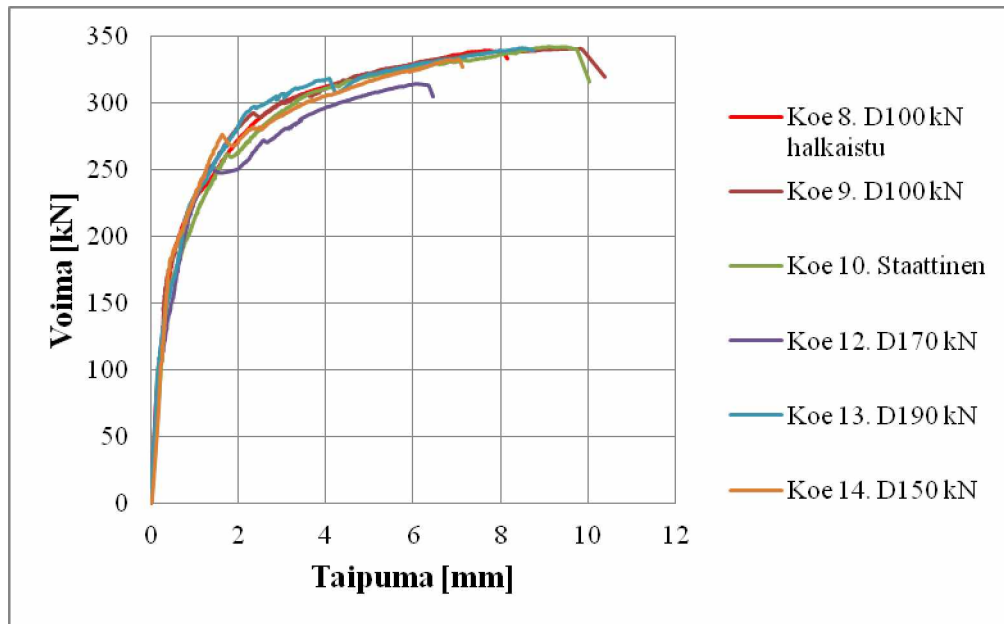
Voima-taipumakuvaajasta voidaan havaita halkeamien syntykohdat niiden pölkkyjen osalta, joihin ei syntynyt halkeamia väsytytkuormituskokeiden aikana. Halkeaman synty voidaan havaita pölkyn jäykkyyden muutoksena. Esimerkiksi kokeessa 10 olleeseen pölkkyyn syntyi ensimmäinen halkeama hieman 150 kN kuormitustason jälkeen taipuman ollessa hieman yli 0,3 mm.



Kuva 2.40 Väsytytkuormituskokeissa olleiden pölkkyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 200 kN kuormitustasolle asti.

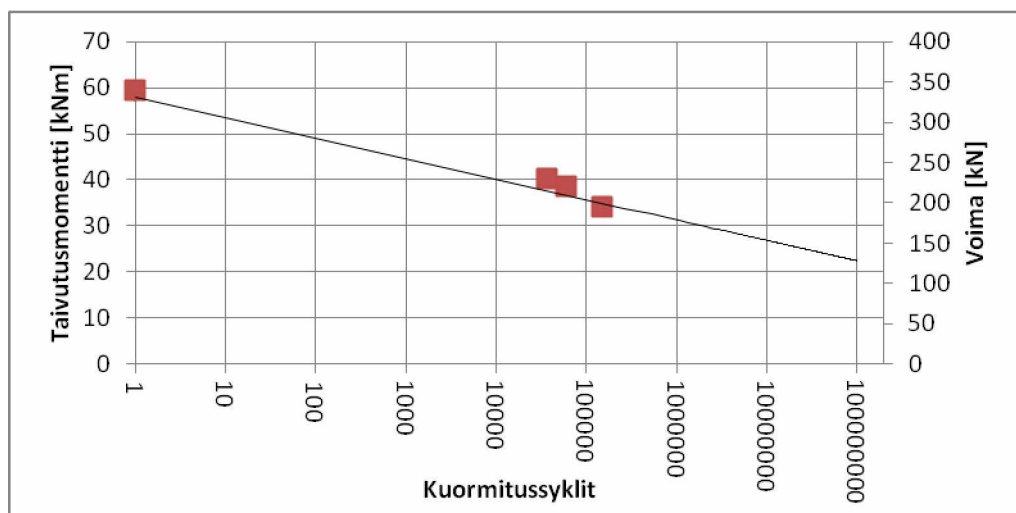
Kuva 2.41 esittää väsytytkuormituskokeiden jälkeisten staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat murtokuormaan asti. Kuvaajasta voidaan havaita, että eri pölkkyjen jäykkyydet ovat hyvin lähellä toisiaan. Ainoa selkeä poikkeus on kokeen 12 pölkky, jonka taipumat kasvavat hetkellisesti muita nopeammin noin 250 kN kuormitustason jälkeen. Nopeampi taipumien kasvu selittyy punosten liukumisella. Punosten tartunta ei kuitenkaan pettänyt lopullisesti vaan punosten liukumisen jälkeen pölkky alkoi ottaa voimia vastaan. Myös kokeiden 13 ja 14 pölkkyjen voima-taipumakuvaajissa on havaittavissa taipumien selkeää kasvua samanaikaisesti, kun kuormitusvoima on pudonnut hieman. Taipumien kasvu voi johtua punosten liukumasta, mikä on kuitenkin ollut vähäisempää verrattuna kokeessa 12 ilmenneeseen liukumaan.

Kuvaajasta voidaan havaita pölkkyissä juuri ennen murtoa ollut taipuma. Murtokuormat on esitetty taulukossa 2.14. Taipuma vaihteli noin 6-10 mm välillä. Suurimmat taipumat olivat kokeiden 9 ja 10 pölkkyissä, joista toinen oli pelkästään staattisesti kuormitettu ja toinen kuormitettu väsytytkuormituskokeessa ilman halkeamaa 100 kN kuormitustasolla. Muiden pölkkyjen murtumishetken taipumat ovat sitä pienempiä, mitä suuremmalla voimalla pölkkyä on kuormitettu väsytytkuormituskokeessa. Poikkeuksena oli väsytytkuormituskokeissa 190 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky. Siinä taipuma maksimikuormalla oli kolmanneksi suurin. Pienentynyt maksimikuorman aiheuttama taipuma saattaa johtua väsymisestä, sillä väsytyksokokeissa pölkkyyn jäänyt pysyvä taipuma on erittäin vähäinen. Osa taipumaeroista saattaa kuitenkin selittyä myös pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla.



Kuva 2.41 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima- taipumakuvaaja murtoon asti.

Väsytytkuormituskokeista saatujen tulosten perusteella pyrittiin tekemään väsymismalli, jolla pystyttäisiin arvioimaan tietyllä rasitustasolla tapahtuvaa väsymistä. Betoniratapölkyn pään väsymismalli on esitetty alla olevassa kuvassa 2.42. Suurin epävarmuustekijä väsymismallissa on mallin perustana olevien kokeiden vähäinen määrä. Näin ollen pölkyissä esiintyvää vaihtelua ei ole voitu arvioida väsymismallia tehtäessä. Malli kuitenkin mahdollistaa todellisiin kuormituskoe tuloksiin perustuvan rata-pölkyn väsymisen arvioinnin. Kirjallisuudesta ei ole vastaavaa väsymisen arviointia mahdollistavaa mallia löydettävissä.



Kuva 2.42 Betoniratapölkyn pään väsytytkuormituskokeiden perusteella tehty väsymismalli pölkyn päälle.

2.5.4 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt

Ratapölkyn pään kuormituskokeiden ratapölkkyjen silmämääräisesti arvioitu kunto ja murtokuorma on esitetty alla olevassa taulukossa 2.15. Kuormitettuja pölkkyjä oli yhteensä seitsemän, joista viisi oli B75- ja kaksi BV69-pölkkyä.

Kokeen V5 B75-pölkyn alapinnasta keskeltä oli lohjennut betonikappale siten, että alimmat jänneterästangot näkyivät. Pölkyn sivuilla oli yksittäisiä lyhyehköjä pituussuuntaisia halkeamia ja pölkyn keskellä pohjassa oli jänneterästen linjalla kulkevat pituussuuntaiset halkeamat lohkeaman molemmin puolin. Pölkkyssä oli myös halkeama kiskon kohdalla pölkyn alapinnassa.

Kokeen V6 BV69-pölkkyssä oli halkeama kiskon kohdalla pölkyn alapinnassa. Silmämääräisesti pölkkyssä ei ollut muita merkittäviä vaurioita.

Kokeen V7 BV69-pölkkyssä oli halkeama kiskon kohdalla pölkyn alapinnassa. Halkeama oli pituudeltaan noin 100–110 mm. Muuten pölkkyssä ei ollut juurikaan silmämääräisesti havaittavia vaurioita.

Kokeen V8 B75-pölkky oli silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoinen ja siinä oli vain pienehköjä pituussuuntaisia säröjä pölkyn sivuilla.

Kokeen V9 B75-pölkystä oli lohjennut aktiivipäästä betonikappale siten, että ylempien jänneterästankojen ankkurointikappaleet näkyivät. Pölkyn sivuilla oli yksittäisiä lyhyehköjä pituussuuntaisia halkeamia ja pölkyn päissä yläpinnassa oli vähäistä verkkohalkeilua. Pölkyn kunto voidaan määritellä lievästi vaurioituneeksi.

Kokeen V10 B75-pölkystä oli lohjennut yksittäisiä pienehköjä betonikappaleita. Pölkyn aktiivipäästä oli lohjennut pieni betonikappale, jolloin yhden ylemmän teräksen pää näkyi. Teräksen ankkurointikappale oli kuitenkin täysin betonin peitossa. Pölkyn sivuilla oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia. Kiskon kohdalla pölkyn alapinnassa oli halkeama, joka ulottui noin 130–140 mm korkeudelle pölkyn sivulla. Pölkky oli kuormitetuista huonokuntoisin ja voidaan määritellä kohtalaisesti vaurioituneeksi.

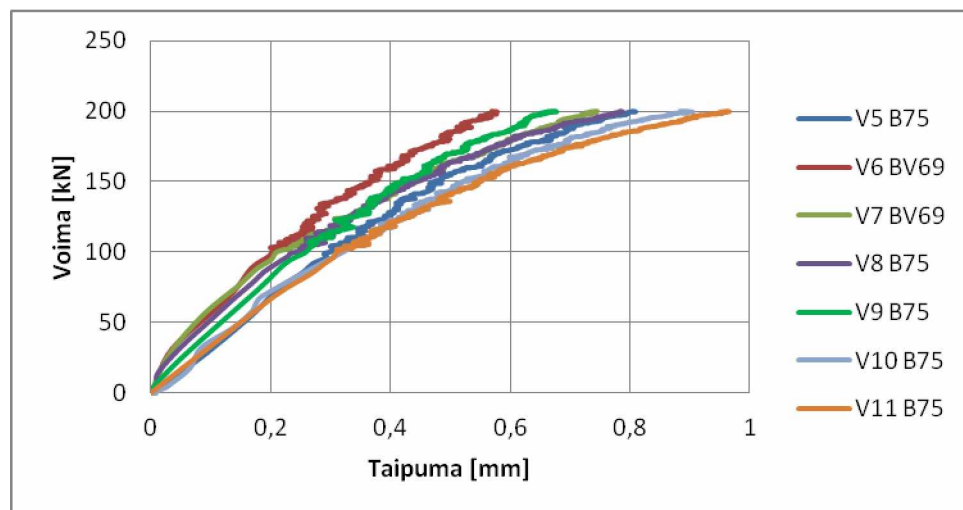
Kokeen V11 B75-pölkky oli silmämääräisesti arvioituna lievästi vaurioitunut. Pölkyn sivuilla oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia ja kuormitettavassa päässä pölkyn sivulla oli noin 25 cm pituinen halkeama. Lisäksi kiskon kohdalla pölkyn alapinnassa oli halkeama, mikä ulottui noin 80 mm korkeudelle pölkyn sivulla.

Taulukko 2.15 Pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa kuormitetut pölkkyt ja murtokuorma.

Koe	Ratapölkky	Kunto	Murtokuorma [kN]
V5	B75	Hyvä	386
V6	BV69	Hyvä	358
V7	BV69	Hyvä	325
V8	B75	Hyvä	391
V9	B75	Lievästi vaurioitunut	410
V10	B75	Kohtalaisesti vaurioitunut	341
V11	B75	Lievästi vaurioitunut	382

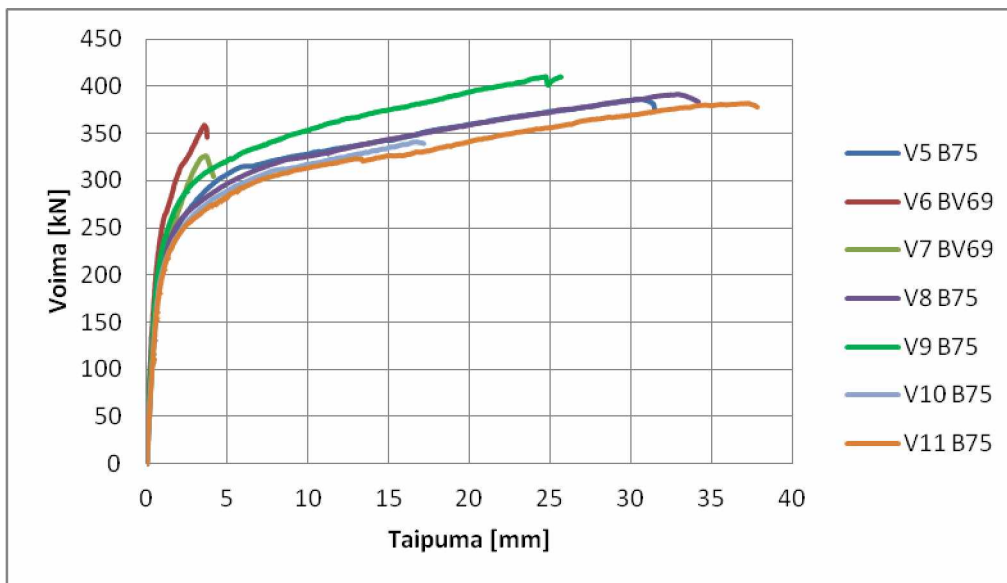
Silmämääräisesti hyväkuntoisten ja lievästi vaurioituneiden pölkkyjen murtokuormissa ei ollut merkittävää eroa ja kohtalaisesti vaurioituneen B75-pölkyn hieman muita pienempi murtokuorma saattaa ainakin osittain selittyä pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Kuormitetuilla BV69-pölkkyillä oli B75-pölkkyihin verrattuna hieman pienempi murtokuorma. B75-pölkkyjen murtokuormien suuruusluokka on sama verrattuna aikaisemmin samalle pölkkytyypille tehdyissä kuormituskokeissa saavutettuihin murtokuormiin.

Kuormituskokeissa mitattiin voiman lisäksi pölkyn pystysiirtymiä kuudella siirtymäanturilla kuvan 2.13 mukaisesti. Kuva 2.43 esittää voima-taipumakuvaajat 200 kN kuormitustasolle asti ja kuva 2.44 esittää voima-taipumakuvaajat koko kuormitukselta.



Kuva 2.43 Vartiuksen radasta poistettujen ratapölkkyjen voima-taipumakuvaaja 200 kN kuormitustasolle asti.

Kuvaajista voidaan havaita, että taipumat vaihtelivat jonkin verran riippuen pölkky-mallista ja pölkyn silmämääräisesti arvioidusta kunnosta. Kuormituksen alkuvaiheessa suurimmat taipumat olivat silmämääräisesti lievästi tai kohtalaisesti vaurioituneiksi arvioiduissa pölkkyissä. Ainoa poikkeus oli kokeen V9 pölkky, joka oli arvioitu lievästi vaurioituneeksi, mutta 200 kN kuormitustasolla pölkkyssä oli kokeiden toiseksi pienin taipuma. Erityisesti taipumat murren yhteydessä olivat selkeästi erisuuruisia BV69- ja B75-pölkkyillä. BV69-pölkkyt murtuivat saavutettuaan noin 4 mm taipuman kun taas B75-pölkkyjen taipumat olivat jopa yli 35 mm.



Kuva 2.44 Vartiuksen radasta poistettujen ratapölkkyjen voima-taipumakuvaaja murtokuormaan asti.

2.5.5 Vertailulaskelmat

2.5.5.1 Staattiset kuormituskokeet

Ratapölkyn kestävyys halkeilurajatilassa ja murtorajatilassa on esitetty kohdassa 2.3.6.

Betoniratapölkyn päässä taulukoissa 2.16 ja 2.17 esitetyt koekuormituksissa saavutetut taivutusmomentit laskettiin keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliille $L = 0,6$ m yksiaukkoisena palkkina seuraavasti: $M = FL/4 = 0,15m \cdot F$.

Kuormitus välitettiin ratapölkkyjen yläpintaan kiskon kohdalle teräslevyn välityksellä. Levyn pituus pölkyn pituussuunnassa oli 140 mm. Betoniratapölkyn pään kuormituskokeiden taivutusmomentti lasketaan keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliille L edellisen lisäksi seuraavasti: $M = F \cdot (L - 0,12m) / 4 = 0,12m \cdot F$. Teräslevyn ja sen alapuolisen kumilevyn kuormaa kahdeksi rinnakkaiseksi pystykuormaksi jakava vaikutus on huomioitu kahden rinnakkaisen kuorman arvioitun keskinäisen etäisyyden 0,12 m avulla.

Taulukko 2.16 Betoniratapölkyn pään staattisten kuormituskokeiden tulokset (Rantala 2010) ja laskennallinen vertailu.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama, taiv.momentti M_{halkeama} [kNm]			Murtoa vastaava taiv.momentti M_{murto} [kNm]		
	Laskenta	Koekuorm $e=0,15\text{m}$	Koekuorm $e=0,12\text{m}$	Laskenta	Koekuorm $e=0,15\text{m}$	Koekuorm $e=0,12\text{m}$
BV75 (koe 3)	21	-	-	40	80	64
BV75 (koe 6)	21	-	-	40	82	66
BV75 (koe 7)	21	-	-	40	73	58
BV75 (koe 8)	21	-	-	40	70	56
BV75 (koe 9)	21	-	-	40	72	57
BV75 (koe 10)	21	-	-	40	70	56
BV75 (koe 11)	21	-	-	40	75	60
Bg7 (koe 2)	24	26	20	46	85	68
Bg7 (koe 12)	24	27	22	46	77	61
BP99 (koe 4)	23	27	22	45	76	61
BP99 (koe 13)	23	29	23	45	72	58
B63 (koe 1)	16	-	-	30	45	36
B75 (koe 14)	17	-	-	32	58	46
B75 (koe 5)	17	-	-	32	60	48

Laskelmat vastaavat paremmin koetulosten mukaan laskettuja taivutusmomenteja, kun teräslevyn vaikutus huomioidaan. Halkeilun laskennallinen arviointi vastasi koetuloksia melko tarkasti eron ollessa keskimäärin vain 3 %, kun huomioidaan sekä $e=0,15\text{m}$ että $e=0,12\text{m}$ momenttivarret. Murtokestävyyden arvioinnissa jäätii laskelmissa selvästi todellisen kuormituskestävyyden alapuolelle; ero oli keskimäärin 61 %. Täsmällisiä syitä näin suurelle erolle ei ole tiedossa. Yhtenä arviona voidaan esittää, että ratapölkkyjen materiaalit, varsinkin punosten murtolujuus, olivat lujempia kuin laskelmissa otaksuttiin).

Kuormituskokeiden lyhyt ja korkea palkki ei todennäköisesti toiminut perinteisen palkkiteorian mukaisesti vaan siihen muodostui sisäisiä puristus- ja vetosauvoja. Ristikkoanalogialla saataisiin hieman edellä esitettyä perinteistä taivutusmomentin laskentatapaa suurempi murtomomenttia vastaava pystysuuntainen pistekuorma lyhyelle jänneväliä.

Koska rakenne toimi ristikkorakenteena, ei myöskään leikkausrasitus syntynyt palkkirakenteen mukaisesti. Laskennallinen leikkauskestävyys jäi selvästi pienemmäksi kuin kokeiden leikkausrasitus palkkirakenteena. Kuormituksen aikainen leikkausvoima kokeessa 4 koko tukivälillä oli $V_{\text{koe4}} = 509 \text{ kN}/2 = 255 \text{ kN}$. Tämä oli suurempi kuin leikkauskestävyys $V_{c,u} = 56 \text{ kN}$ kiskonkiinnikkeen viereisen syvennyksen kohdalla. Koska ratapölkky ei lyhyellä tukivälillä murtunut, voidaan todeta, että perinteistä leikkausmitoitusta ei voida soveltaa kuormituskokeen vertailulaskentaan.

Tämänhetkinen suomalainen vaatimus (RHK 2008) betoniratapölkyn pään taivutusmomenttikestävyydelle on $M_{Rd} = 2 \cdot M_{Rk} = 2 \cdot 17 \text{ kNm} = 34 \text{ kNm}$. Kaikki koetulokset

täyttävät tämän vaatimuksen. Palkkiteoriaan perustuvien laskelmien pohjalta vain B63- ja B75-ratapölkkyt jäävät nykyvaatimuksen alle.

Taulukko 2.17 Koekuormituksissa saavutetut taivutusmomenttien keskiarvot.

Ratapölkkytyyppi	Ensimmäinen halkeama, taiv.momentti M_{halk} [kNm]		Murtoa vastaava taiv.momentti M_{murto} [kNm]	
	Koekuorm $e=0,15\text{m}$	Koekuorm $e=0,12\text{m}$	Koekuorm $e=0,15\text{m}$	Koekuorm $e=0,12\text{m}$
B75	-	-	59	47
BV75	-	-	74	60
B97	26	21	81	65
BP99	28	22	74	59

2.5.5.2 Väsytytkuormituskokeet

Taulukossa 2.18 esitettävät betoniratapölkyn pään väsytytkuormituskokeiden taivutusmomentit lasketaan keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliille $L = 0,8$ m seuraavasti: $M = F \cdot (L - 0,12\text{m}) / 4 = 0,17\text{m} \cdot F$. Teräslevyn ja sen alapuolisen kumilevyn kuormaa kahdeksi rinnakkaiseksi pystykuormaksi jakava vaikutus on huomioitu kahden rinnakkaisen kuorman arvioidun keskinäisen etäisyyden $0,12$ m avulla. Teräslevyn pituus pölkyn pituussuunnassa oli 140 mm.

Taulukko 2.18 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeita vastaavat taivutusmomentit kiskon kohdalla.

Kokeen numero	Väsytytkuorma	Toistuva taivutusmomentti [kNm]
9	B97 (Väsytytkuorma 100 kN)	17
8	B97 (Väsytytkuorma 100 kN, halkaistu)	17
10	B97 (Kuormittamaton)	-
14	B97 (Väsytytkuorma 150 kN)	26
12	B97 (Väsytytkuorma 170 kN)	29
13	B97 (Väsytytkuorma 190 kN)	32
11	B97 (Väsytytkuorma 220kN)	37
15	B97 (Väsytytkuorma 230kN)	39

Lujan ratapölkyn B97 halkeilurajatilalaskelmaa vastaava taivutusmomentti kohdan 2.3.6 mukaan kiskon kohdalla on $M_{R,\text{halkeilu}} = 23,9$ kNm (vrt. taulukko 2.16). Vastaavasti palkkiteoriaan pohjautuvan laskelman mukainen taivutusmurtomomentti $M_{R,\text{murto}} = 45,7$ kNm. Kokeessa 9 ratapölkky ei siis haljennut ja kokeissa 11-15 ratapölkyn toiminta vastasi halkeilurajatilan jälkeistä rakenteen toimintaa. Kokeessa 15 kuormitus vastasi 85 % laskennallisen taivutusmurtomomentin arvosta.

Kokeenaikaisten havaintojen perusteella kokeessa 14 ei syntynyt taivutushalkeilua. Koska betonin vetolujuudella on suuri hajonta, oli ko. ratapölkkyssä halkeilua vastaava

taivutusmomenttikestävyys suurempi kuin laskennallinen halkeamaa vastaava taivutusmomentti.

2.6 Betoniratapölkyn keskiosan kestävyys

2.6.1 Staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan staattisia kuormituskokeita tehtiin kymmenelle käytöstä poistetulle ratapölkylle ja neljälle käyttämättömälle ratapölkylle. Käytöstä poistetut ratapölkkyt olivat silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia lukuun ottamatta B63-ratapölkkyjä. B63-ratapölkkyissä oli havaittavissa useita pituussuuntaisia halkeamia.

Betoniratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa standardi SFS-EN 13230-2:2009 asettaa ainoaksi kriteeriksi ensimmäisen halkeaman syntyyn vaadittavan kuorman suuruuden. Kyseisen kuorman tulee olla suurempi kuin vertailukoekuorma. Kokeessa käytetty vertailukoekuorma oli 25,4 kN, mikä vastasi 215 kN akselikuormaa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h. Standardissa on kuitenkin lisämainintana tilaajan oikeus asettaa halutessaan lisäkriteerejä kuormituskokeelle. Kuormituskokeesta saadut tulokset on esitetty taulukossa 2.19.

Taulukko 2.19 Betoniratapölkyn keskiosan staattisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977, B75-ratapölkkyt 1976 ja B63-ratapölkkyt 1974.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 25 kN *)	Murtokuorma [kN]
BV75 (koe 19)	-	125
BV75 (koe 20)	-	118
BV75 (koe 21)	-	118
BV75 (koe 22)	-	126
BV75 (koe 23)	-	114
BV75 (koe 24)	-	124
BV75 (koe 25)	45	133
B75 (koe 26) (hyväkuntoinen)	-	81
B63 (koe 27) (huonokuntoinen)	45	93
B63 (koe 28) (huonokuntoinen)	35	88
B97 (koe 29)	45	103
B97 (koe 30)	50	109
BP99 (koe 31)	45	100
BP99 (koe 32)	50	102

* Kriteeri on määritetty standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti (ks. luku 2.2.1) ja vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

Kuten taulukosta voidaan havaita, käyttämättömät ratapölkkyt tyypiltään B97 ja BP99 täyttivät ensimmäiselle halkeamalle asetettavat kriteerit selkeästi. Käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä oli jo olemassa olleita pystysuuntaisia halkeamia kolmea poikkeusta luukuun ottamatta. Halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja tästä johtuen lähes mahdottomia havaita ennen ratapölkyn kuormittamista.

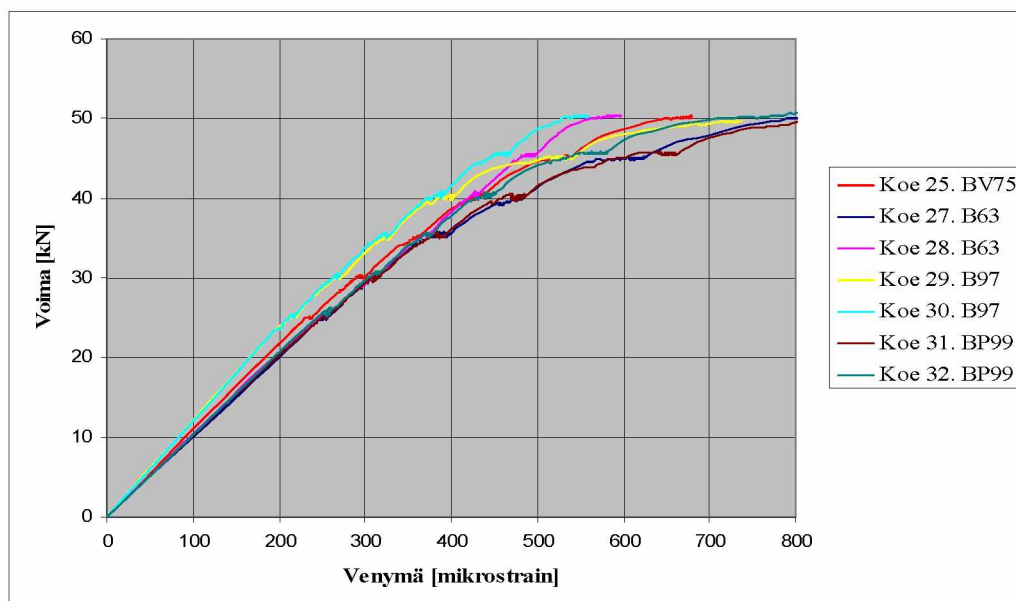
Murtokuorman suhteen heikoimpia olivat B63- ja B75-ratapölkkyt. Kyseisten pölkky-mallien murtokuormat ovat hieman ristiriitaisia, sillä B75:n murtokuorma oli 81 kN, kun taas silmämääräisesti arvioiden selkeästi huonokuntoisempien B63- ratapölkkyjen murtokuormat olivat 88 kN ja 93 kN. Osaltaan ristiriitaisia murtokuormia saattaa selittää se, että B75-ratapölkkyssä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia kuormitusalueella. B63-ratapölkkyissä ei havaittu ennen kuormittamista olleita pystysuuntaisia halkeamia, vaan B63:ssa oli ainoastaan selkeitä pituussuuntaisia halkeamia ja rapautumisen merkkejä.

Myös BV75-ratapölkkyjen murtokuormat olivat hieman ristiriitaisia verrattuna käyttämättömiin B97 ja BP99 pölkkyihin. BV75:llä on pienempi poikkileikkaus samalla punosmäärällä suhteessa B97 ja BP99:iin, jolloin myös murtokuorman tulisi olla pienempi. Kuitenkin BV75-ratapölkkyillä murtokuormat olivat selkeästi suurimmat vaihdellen 114 kN ja 133 kN välillä, kun taas B97 ja BP99 murtokuormat vaihtelivat 100 kN ja 109 kN välillä.

Kuvassa 2.45 on esitetty ratapölkkyissä mitatut venymät ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa. Venymät ovat pölkkyistä, joissa ei ollut pystysuuntaisia halkeamia ennen kuormittamista.

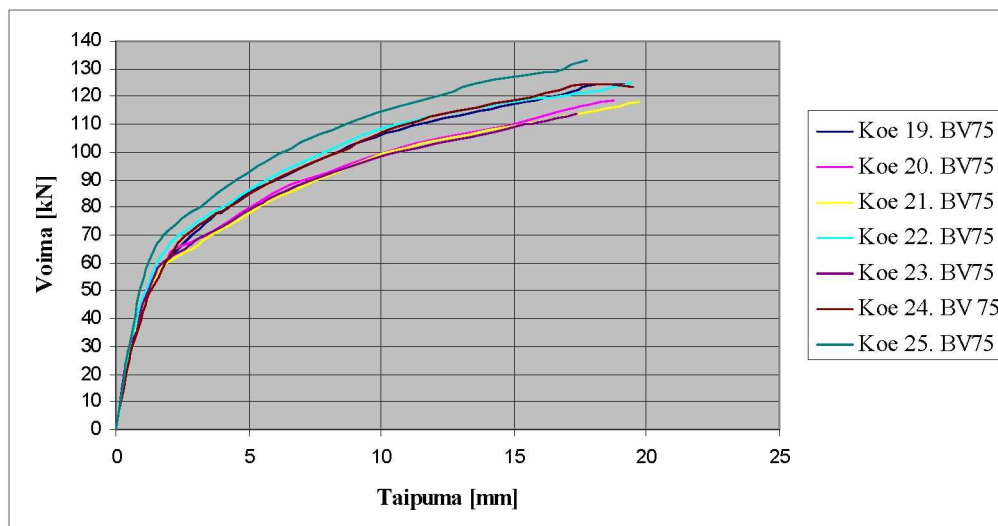
Betoniin muodostuvat venymät kasvoivat suhteellisen tasaisesti aina ensimmäiseen halkeamaan saakka. Kuten pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa, B97-ratapölkkyissä havaittiin halkeama pienimmillä venymätasoilla. Kokeessa 29 havaittiin ensimmäinen halkeama 45 kN kuormitusportaalla. Tuolloin mitatussa venymässä on havaittavissa selkeää kasvua. Vastaavasti kokeessa 30 ensimmäinen halkeama havaittiin 50 kN kuormitustasolla. Näin ollen betonin venymät olivat noin 420-500 $\mu\text{m}/\text{m}$ ensimmäisen halkeaman muodostuessa B97-ratapölkkyyn.

BP99-ratapölkkyillä kokeessa 31 ensimmäinen halkeama havaittiin 45 kN ja 50 kN kuormitustasolla kokeessa 32. Tuolloin betonissa mitatut venymät olivat noin 480-580 $\mu\text{m}/\text{m}$ ollen näin hieman B97-ratapölkkyä suuremmat.

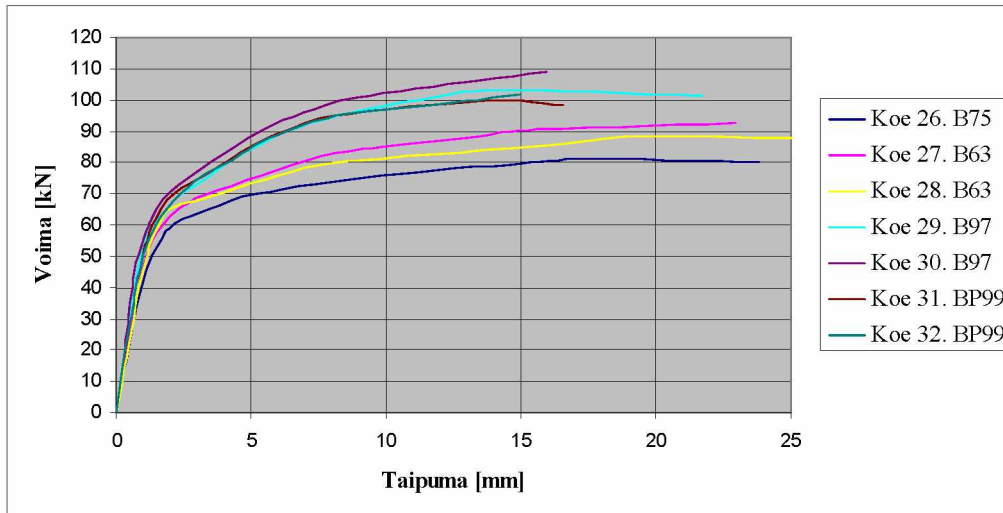


Kuva 2.45 Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa.

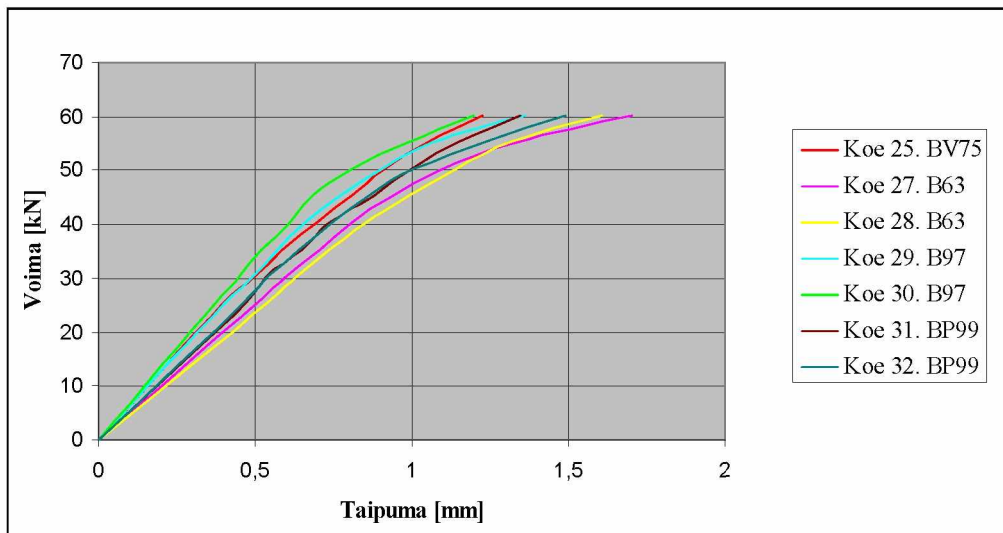
Ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituksessa mitatut taipumat on esitetty kootusti kuvissa 2.46 ja 2.47. Lisäksi kuvassa 2.48 on esitetty taipumat 60 kN asti ratapölkkyistä, joissa ei ollut halkeamia ennen kuormittamista. Kuvaajissa oleva taipuma ei ole maksimitaipuma vaan keskimmäisten siirtymäantureiden (kuva 2.11) avulla määritettyjen taipumien keskiarvo. Kokeessa keskimmäiset siirtymäanturit olivat kuitenkin vain 105 mm etäisyydellä kuormituksen keskipisteestä. Tästä johtuen esitettyjen taipumien ero maksimitaipumaan on vähäinen.



Kuva 2.46 Ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat BV75-ratapölkkyillä.



Kuva 2.47 Ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat B75-, B63-, B97- ja BP99-ratapölkkyillä.



Kuva 2.48 Taipumat 60 kN kuormitustasoon saakka ratapölkkyissä, joissa ei ollut halkeamia ennen kuormittamista.

Ratapölkkytyypistä riippumatta taipumat kasvoivat suhteellisen tasaisesti aina 50-60 kN kuormitustasoon asti. Kuormitustason ollessa 50 kN pölkkytyyppien BV75, B63 ja B75 taipumat olivat 1,1-1,3 mm kuormitetusta pölkystä riippuen. Vastaavasti B97-ratapölkkyjen taipumat olivat 0,8-0,9 mm ja BP99-pölkkyjen 1,0 mm. Yhtenä selittävästä tekijöistä B97- ja BP99-pölkkyjen hieman suurempaan jäykkyyteen kuormituskokeen ensimmäisillä voimaportilla on käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä esiintyneet käytön aikana syntyneet pystysuuntaiset halkeamat. Halkeamat alkoivat avautua kuormien noston yhteydessä aiheuttaen hieman nopeampaa taipumien kasvua. Kuormitustason noustessa yli 60 kN alkoivat B63- ja B75-ratapölkkyjen taipumat kasvamaan muita pölkkytyyppejä nopeammin.

Ratapölkyn keskiosan taipumissa huomionarvoista on taipumien suuruus suurimmilla ratapölkkyjen kuormitustasoilla. Tuolloin B97- ja BP99-ratapölkkyissä taipumat olivat noin 15 mm ja BV75-ratapölkkyillä noin 17-19 mm. Suurimmat taipumat muodostuivat B63- ja B75- pölkkyihin, joissa ne olivat noin 23-25 mm. Lisäksi huomionarvoista on

eri ratapölkkytyypeillä ensimmäisen halkeaman havainnointihetkellä mitattu taipuma. Kyseinen taipuma oli pölkkytyypistä riippumatta vain noin 0,8-1 mm. Yhden millimetrin taipuman muodostuminen ratapölkkyyn todellisissa olosuhteissa on mahdollista erityisesti pehmeän ratapenkereen tapauksessa (luku 4.3).

2.6.2 Dynaaminen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisia kuormituskokeita tehtiin kahdelle käytöstä poistetulle ja kahdelle käyttämättömälle ratapölkylle. Standardi SFS-EN 13230-2 ei sisällä kyseistä koetta, joten kokeelle ei ole varsinaisia standardin asettamia kriteereitä.

Taulukossa 2.20 esitettävistä ratapölkyn keskiosan dynaamisissa kuormituskokeissa saaduista tuloksista voidaan havaita, että B97- ja BP99-ratapölkkyillä saadut tulokset eivät juurikaan poikkea keskiosan staattisissa kuormituskokeissa saaduista tuloksista. Tulos on hieman yllättävä, sillä pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa murtokuorma oli noin 20 % suurempi verrattuna dynaamisissa kokeissa mitattuun kuormaan.

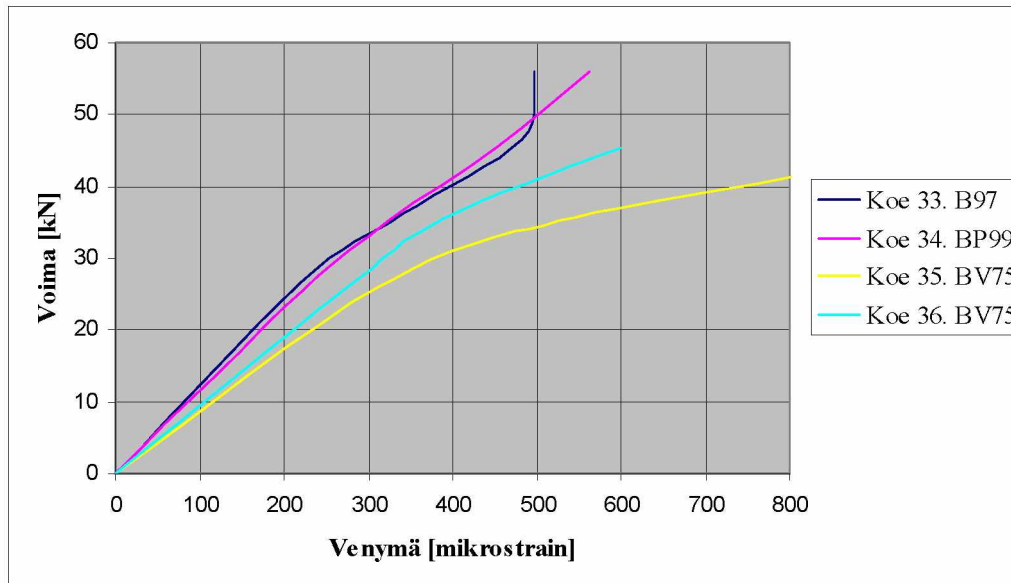
Taulukko 2.20 Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN]	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN]	Murtokuorma [kN]
BV75 (koe 35)	-	85	105 (3346 sykliä)
BV75 (koe 36)	35	95	115 (2187 sykliä)
B97 (koe 33)	45	85	105 (4842 sykliä)
BP99 (koe 34)	45	85	105 (857 sykliä)

BV75-ratapölkkyissä murtokuormat olivat hieman pienempiä verrattuna staattisissa kokeissa mitattuihin kuormiin. Ero ei ole kuitenkaan merkittävä ja voi selittyä osittain käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä esiintyvällä koetulosten suuremmalla hajonnalla.

Koetulosten avulla voidaan esittää varovainen arvio dynaamisten kuormien merkityksestä ratapölkkyyn. Koetulosten perusteella dynaamiset kuormat vaikuttavat kriittisemmin kiskon kohdalla verrattuna pölkyn keskiosaan.

Ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa mitattuja betonin venymiä on esitetty kuvassa 2.49. Kuvasta voidaan selkeästi havaita halkeamien muodostumiskohdan merkitys venymämittaustuloksiin. Esimerkiksi kokeessa 33 ensimmäinen havaittu halkeama syntyi 45 kN kuormitustasolla venymäanturin ulkopuolelle, jolloin mitattujen venymien kasvu pysähtyi lähes täysin. Vastaavasti ratapölkkyssä kokeessa 35 oli halkeama ennen kuormituskokeen aloittamista ja halkeama sijaitsi anturin mitausalueella. Kuvasta voidaan havaita, että olemassa olleen halkeaman avautuessa venymät kasvoivat voimakkaasti.



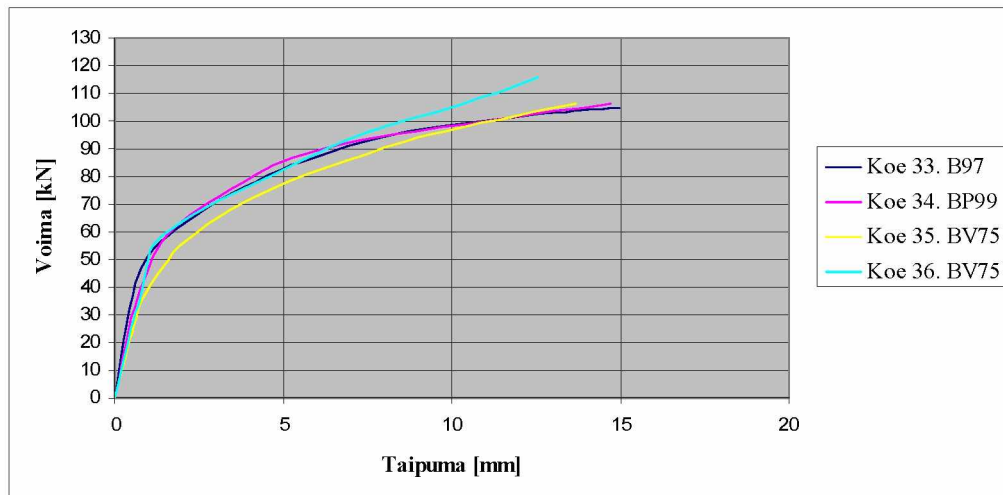
Kuva 2.49 Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa.

Dynaamisissa pölkyn keskiosan kuormituskokeissa ensimmäinen halkeama havaittiin B97- ja BP99-pölkkyissä 45 kN kuormitustasolla. Tuolloin pölkkyistä mitatut venymät olivat noin 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ ollen näin hieman pienempiä verrattuna staattisiin kuormituskokeisiin. Vähäisten dynaamisten kuormituskokeiden määrästä johtuen pienempi venymä saattaa selittyä ratapölkkyissä esiintyvillä ominaisuuksien hajonnalla.

Kokeessa 36 BV75-ratapölkkyssä ensimmäinen halkeama havaittiin 35 kN kuormitustasolla mitatun venymän ollessa tuolloin noin 350 $\mu\text{m}/\text{m}$. Halkeama muodostui venymäanturin ulkopuolelle. Halkeama on saattanut olla olemassa ennen kuormittamista, mutta ratapölkkyssä oleva esijännitys on pystynyt pitämään sen ummessa aina 35 kN kuormitustasolle asti. Tämä selittäisi selkeästi muita pölkkyjä pienemmän venymän halkeaman havainnointihetkellä.

Verrattuna ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa mitattuihin venymiin keskiosan staattisissa kuormituskokeissa ensimmäisen halkeaman syntyessä mitatut venymät olivat hieman suurempia. Tämä selittyy kuitenkin suuremmasta esijännityksen aikaansaamasta puristumasta pölkyn keskellä.

Kuvassa 2.50 on esitetty kootusti ratapölkyn keskiosan dynaamisista kuormituskokeista mitatut taipumat. Kuten staattisissa kuormituskokeissa, taipuma ei kuvaa maksimitaipumaa vaan keskimmäisten siirtymäanturien (kuva 2.11) keskiarvona määritettyä taipumaa.



Kuva 2.50 Ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa mitatut taipumat.

Dynaamisessa kuormituskokeessa taipumat kasvoivat kokeissa 33, 34 ja 36 tasaisesti noin 50 kN asti, minkä jälkeen taipumien kasvunopeus suhteessa kuormitustasoon kiihtyi huomattavasti. BV75-ratapölkkyllä kokeessa 35 taipumat kasvoivat 35 kN kuormituksen jälkeen hieman muita pölkkyjä nopeammin.

Huomionarvoista dynaamisissa kuormituskokeissa mitatuissa taipumissa on taipumat juuri ennen murtoa. B97- ja BP99-pölkkyissä taipuma oli noin 15 mm, mikä vastasi kyseisillä pölkkytyypeillä staattisissa kokeissa juuri ennen murtoa mitattua taipumaa. BV75-pölkkyillä dynaamisissa kokeissa mitattu taipuma ennen murtoa oli kuitenkin noin 5 mm pienempi verrattuna staattisiin kuormituskokeisiin.

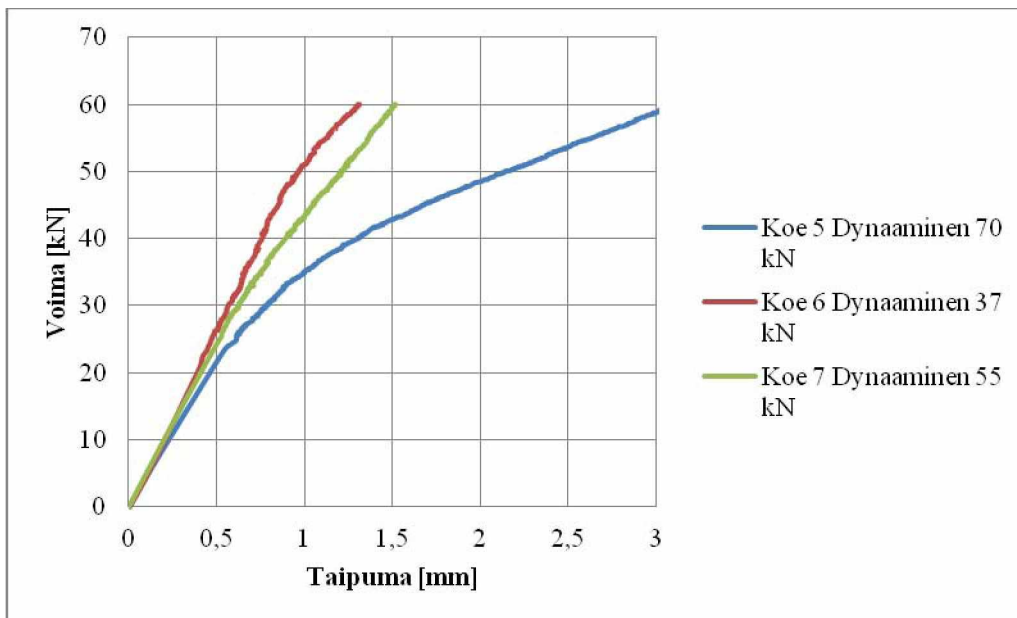
2.6.3 Väsytyskuormituskokeet

Pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeita (ks. luku 2.4.6 tehtiin yhteensä kolme kappaletta. Taulukko 2.21 esittää tehdyt väsytyskuormituskokeet ja väsytyskuormituskokeiden jälkeen tehdyistä staattisista kuormituskokeista saadut murtokuormat. Kokeessa 6 dynaamiseksi kuormitustasoksi valittiin 37 kN, mikä on aikaisempien kuormituskoe tulosten perusteella halkeamarajatilan alapuolella oleva kuorma. Kokeen 7 kuormitustasoksi valittiin 55 kN, mikä on hieman halkeamarajatilan yläpuolella ja kokeessa 5 kuormitustaso oli 70 kN, mikä on selkeästi halkeamarajatilan yläpuolella oleva kuorma. Kuormitustasoilla 55 kN ja 70 kN havaittiin ensimmäiset halkeamat heti kokeen alussa. Taulukosta voidaan huomata, että 37 kN ja 55 kN kuormitustasoilla kuormitettujen pölkkyjen staattisista kokeista saadut murtokuormat ovat lähes samat. Murtokuormat vastaavat myös standardin EN 13230-2 mukaan käyttämättömille ratapölkkyille tehdyissä staattisissa kokeissa saatuja murtokuormia, vrt. Taulukko 2.19. Tästä johtuen murtokuormien perusteella ei voida todeta, että väsymistä olisi tapahtunut. Sen sijaan 70 kN kuormitustasolla kuormitetun pölkyn murtokuorma on pudonnut selkeästi, joten merkittävää väsymistä on tapahtunut väsytyskuormituskokeen aikana. Pienempi murtokuorma oli odotettu tulos, sillä väsytyskuormituskokeen aikana ainakin kolme punoksen lankaa katkesi. Ensimmäinen lanka katkesi noin 180 000 syklin kohdalla ja kaksi seuraavaa noin 195000-199000 syklin kohdalla.

Taulukko 2.21 Pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeet ja staattisista kokeista saadut murtokuormat.

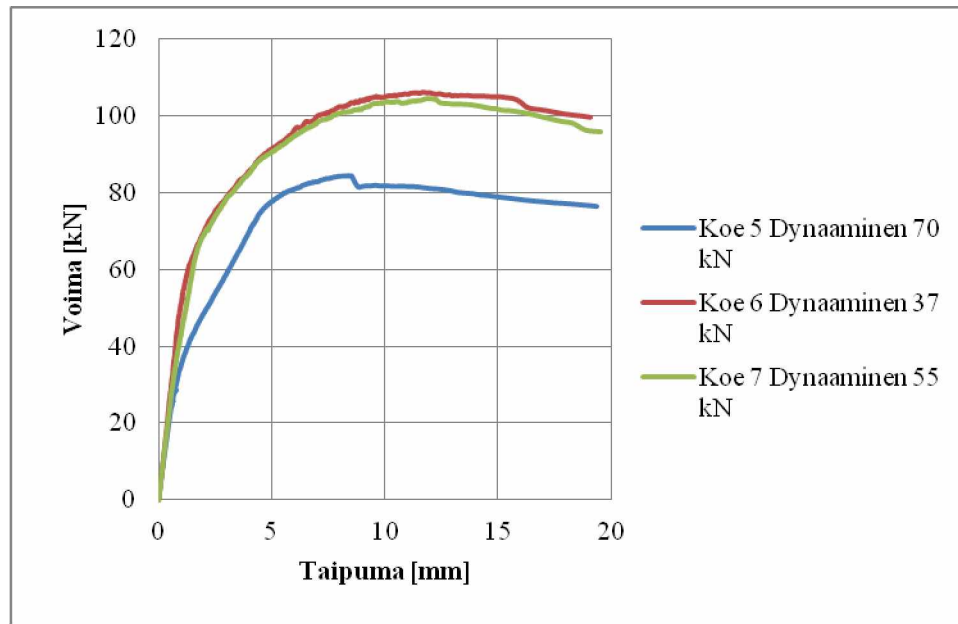
Kokeen numero	Väsytyskuorma	Murtokuorma [kN]
6	BP99 (Väsytyskuorma 37 kN)	106
7	BP99 (Väsytyskuorma 55 kN)	104
5	BP99 (Väsytyskuorma 70 kN)	84

Kuva 2.51 esittää väsytyskuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasoon saakka. Kuvasta voidaan havaita, että kuormituksen alkuvaiheilla jäykkyydeltään selkeästi heikoin oli kuormitustasolla 70 kN kuormitettu kokeen 5 pölkky. Pölkyn taipuma 60 kN kuormitustasolla oli hieman yli kolme millimetriä. Kokeiden 6 ja 7 pölkkyjen jäykkyydessä oli vain vähäinen ero. Kokeen 6 pölkyn taipuma oli 60 kN kuormitustasolla noin 1,3 mm ja kokeen 7 pölkyn taipuma 1,5 mm.



Kuva 2.51 Väsytyskuormituskokeiden jälkeen pölkyn keskiosalle tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasolle asti.

Kuva 2.52 esittää pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kokeiden koko voima-taipumakuvaajat. Kuvasta voidaan huomata, että kokeen 5 pölkkyssä on selkeästi pienempi jäykkyys verrattuna kokeiden 6 ja 7 pölkkyihin. Kokeiden 6 ja 7 pölkkyjen jäykkyydessä ei ole juurikaan eroa. Maksimikuorman aikaansaama taipuma oli kokeissa 6 ja 7 noin 12 mm. Kokeessa 5 olleessa pölkkyssä maksimikuorman aiheuttama taipuma oli noin 8 mm, mikä on selkeästi pienempi verrattuna toisiin testattuihin pölkkyihin.



Kuva 2.52 Väsytyskuormituskokeiden jälkeen pölkyn keskiosalle tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat.

Taulukko 2.22 esittää pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeiden aikana mitattuja taipumia noin 50000 syklin välein. Taipumat ovat ilmoitettu millimetreinä. Taulukossa on esitetty pohjavoiman, eli voiman jonka alle kuormat eivät pudonneet kokeen aikana, aikaansaama taipuma ja maksimikuorman aikaansaama taipuma. Taulukosta voidaan huomata, että kokeessa 6 mitatut taipumat pysyivät lähes samana koko kokeen ajan. Tästä voidaan arvioida, että 200000 sykliä ei aikaansaanut väsymistä kuormitustasolla 37 kN. Kokeessa 7 maksimikuorman aikaansaama taipuma kasvoi hieman kokeen aikana. Tämä saattaa olla merkki väsymisestä, joskin väsyminen on ollut vähäistä. Tästä syystä aikaisemmin esitetty staattinen murtokuorma ei ollut muuttunut. Kokeessa 5, jossa kuormitustasona oli 70 kN, havaittiin selkeää väsymistä. Pohjavoiman aikaansaama taipuma kasvoi hieman ja maksimikuorman aikaansaama taipuma merkittävästi. Suurinta taipuman kasvu oli 150 000-200 000 syklin välillä. Tämä selittyy yksittäisten punosten lankojen katkeamisilla, jolloin pölkyn jäykkyys on alentunut selvästi.

Taulukko 2.22 Väsytyskuormituskokeissa syklien aikana mitatut taipumat ja taipumien kasvu kokeen edetessä. Taipumat on ilmoitettu millimetreinä.

		Syklit				
		10000	50000	100000	150000	200000
Koe 6	37 kN 0-15 kN	0,31	0,31	0,31	0,31	0,35
	37 kN 0-37 kN	0,68	0,67	0,69	0,69	0,72
Koe 7	55 kN 0-15 kN	0,35	0,36	0,34	0,41	0,39
	55 kN 0-55 kN	1,27	1,26	1,33	1,46	1,45
Koe 5	70 kN 0-15 kN	0,47	0,5	0,55	0,54	0,87
	70 kN 0-70 kN	2,7	2,94	3,12	3,24	4,38

Väsytytkuormituskokeista saatujen tulosten perusteella tehtiin ratapölkyn päälle väsymismalli, jolla pystyttiin arvioimaan tietyllä rasitustasolla tapahtuvaa väsymistä (kohta 2.5.3). Pään väsymismallin perusteella voidaan tehdä myös karkea väsymismalli ratapölkyn keskiosalle halkeamattoman ratapölkyn kiskon kohdan ja keskikohdan poikkileikkausten taivutusvastusten W avulla määräämällä venymä ϵ yhtä suureksi kiskonkohdan alapinnalla ja keskikohdan yläpinnalla. Uusille ratapölkkyille saadaan laskennan tuloksena taivutusmomenttien suhteeksi 1,96 ja kiskon kohdan taivutusmomenttia $M = 26$ kN vastaavaksi momentiksi $M = 13$ kN. Väsytykskokeen kuormitusjärjestelyillä toistuvaksi kuormaksi keskikohdalla saadaan täten 34 kN, joka on hieman pienempi kuin keskikohdan kuormitusjärjestelyissä käytetty pienin väsytyskuorman arvo.

2.6.4 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa olleet pölkkyt, silmämääräisesti arvioitu kunto ja murtokuorma on esitetty alla olevassa taulukossa 2.23. Kuormituskokeissa oli yhteensä kolme pölkkyä, joista kaksi oli B75 pölkkyä ja yksi BV69 pölkky.

Kuormitettu BV69 (V12) pölkky oli silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoinen. Pölkystä oli lohjennut pienehköjä betonikappaleita molemmista päistä sekä alapinnasta keskeltä. Osa lohkeamista on saattanut syntyä pölkyn raiteesta oton yhteydessä.

Kuormitetuista B75-pölkkyistä toinen oli hyväkuntoinen ja toinen lievästi/kohtalaisesti vaurioitunut. Parempikuntoisessa pölkkyssä (V13) oli yksittäisiä lyhyehköjä pituussuuntaisia halkeamia pölkyn sivuilla ja aktiivipäästä oli lohjennut betonin kappale siten, että ylempien jänneterästankojen ankkurit näkyivät osittain. Huonompikuntoisessa pölkkyssä (V14) aktiivipäästä oli lohjennut kappale, jolloin kaikkien jänneterästankojen ankkurit näkyivät. Tämän lisäksi pölkyn yläpinnasta oli lohjennut betonikappale (kuva 2.53), jolloin toinen yläpinnan teräksistä näkyi hieman. Pölkyn sivuilla oli yksittäisiä pienehköjä pituussuuntaisia halkeamia sekä yksi vain pölkyn toisella puolella ylempien terästen linjalla kulkeva pituussuuntainen halkeama. Myös pölkyn päissä yläpinnassa oli terästen linjalla kulkevat halkeamat (kuva 2.53).



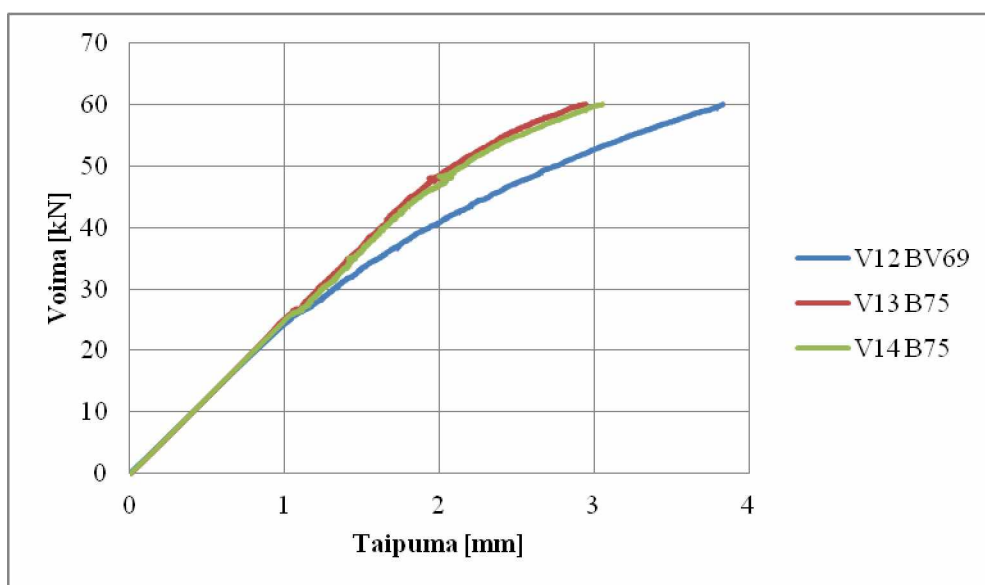
Kuva 2.53 Vasemmalla kohtalaisesti vaurioitunut B75 pölkky (V14) ja oikealla saman pölkyn pään pituussuuntaisia halkeamia.

Taulukko 2.23 Pölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa olleiden pölkkyjen silmämääräisesti arvioitu kunto ja kokeiden murtokuormat.

Koe	Ratapölkky	Kunto	Maksimikuorma [kN]
V12	BV69	Hyvä	102
V13	B75	Hyvä	91
V14	B75	Kohtalaisesti vaurioitunut	94

Taulukosta voidaan havaita, että silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisten ja kohtalaisesti vaurioituneiden pölkkyjen murtokuormissa ei ole juurikaan eroa. BV69-pölkyn murtokuorma oli hieman B75 pölkkyä suurempi, mikä johtuu BV69-pölkyn erilaisesta poikkileikkauksesta. Huomionarvoista on kuitenkin se, että BV69:ssä on pölkyn keskellä sama poikkileikkaus ja punosmäärä, kuin aikaisemmin kuormitetuissa BV75-pölkkyissä. Aikaisemmin kuormitetuissa BV75-pölkkyissä murtokuorma oli kuitenkin keskimäärin 122,5 kN, mikä on jonkin verran suurempi verrattuna kuormitettuun Vartiuksen BV69-pölkkyyn. BV69 pienempi murtokuorma saattaa kuitenkin osittain selittyä vaihtelulla, mitä esiintyy myös samantyyppisillä pölkkyillä. Huomion arvoista on myös se, että murtokuormat ovat hyvin lähellä nykyään valmistettavien ratapölkkyjen murtokuormia.

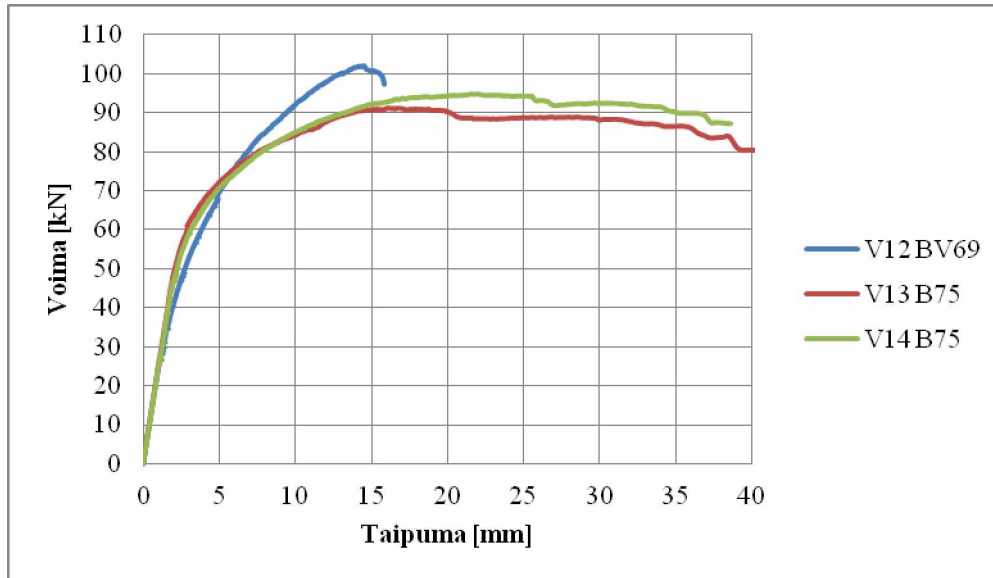
Kuormituskokeissa mitattiin voiman lisäksi pölkyn pystysiirtymiä kuudella siirtymäanturilla. Antureilla mitattu pölkyn taipuma ei ole maksimitaipuma, mutta ero maksimitaipumaan on vähäinen. Kuva 2.54 esittää voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasolle asti ja kuva 2.55 esittää voima-taipumakuvaajat koko kuormituksesta.



Kuva 2.54 Keskiosasta kuormitettujen ratapölkkyjen voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasoon saakka.

Kuvaajasta voidaan huomata, että BV69-pölkyn jäykkyys verrattuna B75-pölkkyihin oli hieman pienempi kuormituksen alkupuoliskolla. B75-pölkkyjen jäykkyydessä ei ollut juurikaan eroa 60 kN kuormitustasoon mennessä. Tulos on hieman yllättävä, sillä kokeen V14 pölkky oli selkeästi huonokuntoisemman näköinen verrattuna kokeen V13 pölkkyyn. B75-pölkkyjen taipuma oli 60 kN kuormitustasolla hieman alle kolme millimetriä ja BV69-pölkyn noin millimetrin enemmän.

Vertailtaessa Vartiuksen radasta poistettujen pölkkyjen jäykkyyttä Vihannin raiteesta toimitettuihin pölkkyihin, voidaan todeta, että B75-pölkkyjen taipuma 50 kN kuormitustasolla oli sama kuin halkeilleiden B97 pölkkyjen. Vastaavasti halkeilemattomiksi arvioitujen B97-pölkkyjen taipuma 50 kN kuormitustasolla oli noin puolet B75-pölkkyjen taipumasta.



Kuva 2.55 Keskiosasta kuormitettujen ratapölkkyjen voima-taipumakuvaajat.

Kuvasta 2.55 voidaan havaita, että BV69-pölkyn taipuma murroksessa oli B75-pölkkyjä pienempi. BV69 pölkyn taipuma oli murroksessa noin 14 mm. Maksimikuorman aikana B75-pölkkyissä taipuma oli noin 16 mm (V13) ja 22 mm (V14). Huomionarvoista on se, että sen jälkeen kun B75-pölkkyt saavuttivat maksimikuorman, taipuman kasvamiseen vaadittu voima putosi. Tämän jälkeen taipumien kasvamiseen vaadittava voima kasvoi kuitenkin hieman ennen kuin pölkyn kyky vastaanottaa voimia putosi merkittävästi. BV69 pölkkyssä taipuman kasvattamiseen vaadittava voima putosi lähes välittömästi maksimikuorman saavuttamisen jälkeen.

Keskiosan kuormituskokeissa murtotapana oli taivutus-puristusmurto, jolloin puristuspuolen betonin jännitykset ylittivät betonin puristuslujuuden ja betoni murtui. Jänneteräkset eivät menneet poikki.

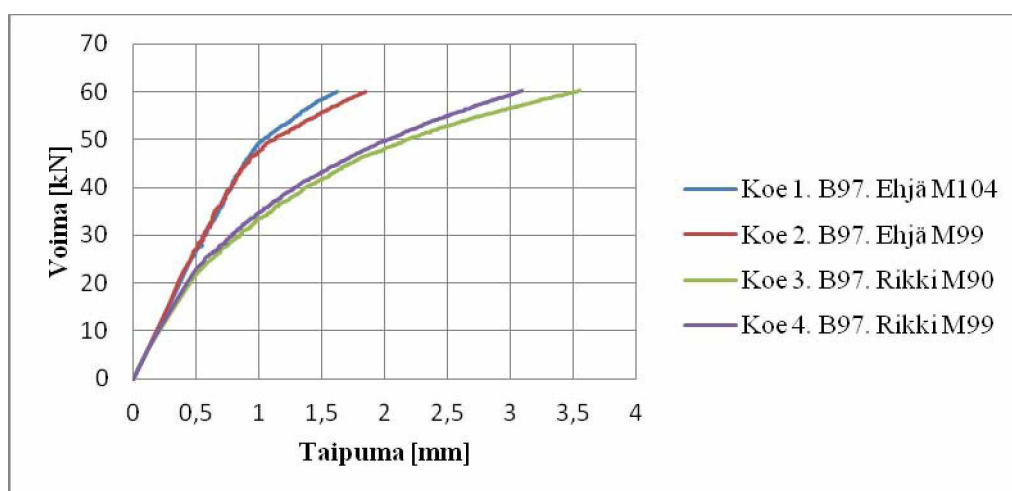
2.6.5 Vihannin raiteessa halkeilleet ratapölkkyt

Radassa halkeilleista ratapölkkyistä toisessa oli neljä ja toisessa kahdeksan silmämääräisesti havaittavaa halkeamaa (ks. luku 2.3.3). Halkeamien pituudet pölkyn sivuilla vaihtelivat noin 30-80 mm välillä ja leveydet pölkyn yläpinnalla noin 0,04-0,1 mm välillä.

Kokeessa 1 kuormitettiin silmämääräisesti arvioiden ehjä ratapölkky. Ensimmäinen halkeama havaittiin hieman ennen 50 kN kuormitustasoa. Kuva 2.56 esittää voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitukseen asti. Kuvaajasta voidaan havaita ratapölkkyjä jäykkyyden muuttuminen halkeaman muodostumisen jälkeen. Murtokuorma oli noin 104 kN ja murron yhteydessä alimmat punokset menivät poikki.

Kokeessa 2 oli myös kuormitettavana silmämääräisesti arvioiden ehjä ratapölkky. Ensimmäinen halkeama havaittiin hieman ennen 45 kN kuormitustasoa. Halkeaman muodostuminen on myös havaittavissa kuvasta pölkyn jäykkyyden muutoksena. Murtokuorma oli noin 99 kN ja murren yhteydessä alimmat punokset menivät poikki.

Kokeessa 3 kuormitetussa pölkkyssä oli neljä silmämääräisesti havaittavaa halkeamaa. Murtokuorma kyseiselle pölkylle oli noin 90 kN ja murren yhteydessä alimmat punokset menivät poikki. Kokeessa 4 kuormitetussa ratapölkkyssä oli kahdeksan silmämääräisesti havaittavaa halkeamaa. Murren yhteydessä punoksia ei mennyt poikki ja murtokuorma oli noin 99 kN.

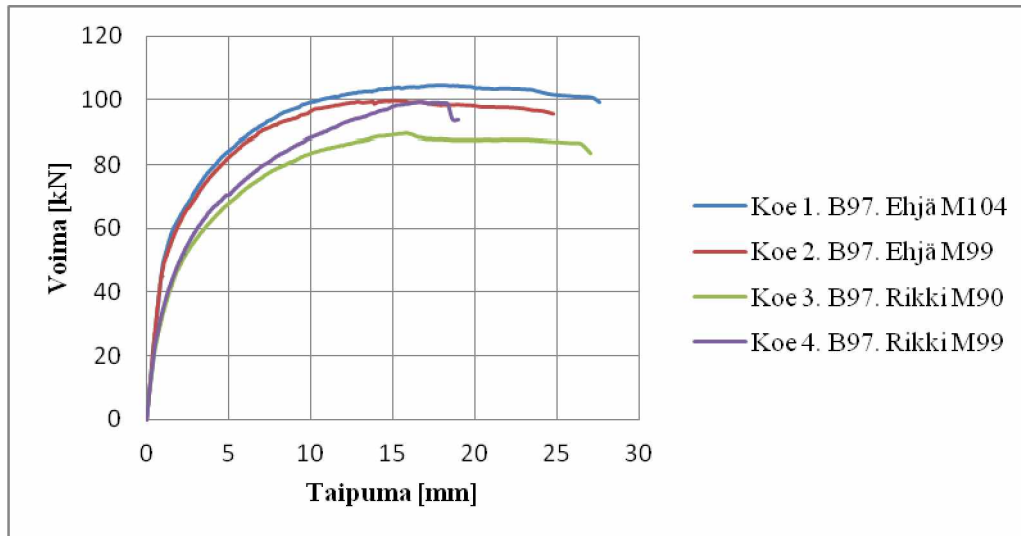


Kuva 2.56 Koekuormitetut ratapölkkyt kokeissa 1-4. Kokeen 1 ja 2 pölkkyt olivat ehjiä ja kokeen 3 ja 4 pölkkyt radassa haljenneita.

Kuvasta 2.56 voidaan havaita, että haljenneiden pölkkyjen taipumat olivat kuormien kasvaessa selkeästi suurempia ja näin ollen jäykkyydet pienempiä verrattuna silmämääräisesti halkeilemattomiin pölkkyihin. Esimerkiksi 50 kN kuormitustasolla radassa haljenneiden pölkkyjen taipumat olivat noin kaksinkertaiset verrattuna halkeilemattomiin pölkkyihin. Huomioitavaa on kuitenkin se, että pääsääntöisesti radassa pölkkyihin kohdistuvat rasitukset ovat pienempiä kuin kuormituskokeessa 50 kN kuormalla pölkkyyn kohdistuvat rasitukset (vrt. luku 3.4). Esimerkiksi 20-30 kN kuormitustasolla haljenneiden ja halkeamattomien pölkkyjen taipumien suuruudet olivat hyvin lähellä toisiaan. Lisäksi kuvasta voidaan huomata hyvin kuormitustasot, joilla ensimmäiset halkeamat ovat syntyneet oletetusti ehjiin ratapölkkyihin.

Radassa haljenneiden B97-pölkkyjen taipumat oli 50 kN kuormitustasolla hieman yli 2 mm. Myös Vartiuksen radasta poistettujen B75-pölkkyjen taipumat 50 kN kuormitustasolla olivat hieman yli 2 mm ja BV69-pölkkyllä taipuma oli noin 2,7 mm.

Kuva 2.57 esittää voima-taipumakuvaajat aina murtokuormitukseen saakka. Kuvasta voidaan havaita, että suurimmat kuormat, mitkä ratapölkky pystyivät vastaanottamaan, aiheuttivat noin 15-18 mm taipuman. Maksimikuormituksen saavuttamisen jälkeen taipumat kasvoivat kuormien pysyessä vakiona tai kuormien hieman laskiessa, kunnes pölkky murtui.



Kuva 2.57 Voima-taipumakuvaaja koekuormituksissa 1-4.

Radassa haljenneiden ja halkeamattomien pölkkyjen murtokuormissa ei ollut suurta eroa. Ainoastaan kokeessa 4 olleen ratapölkyn murtokuorma oli noin 10 kN muita pienempi. Kyseisessä pölkkyssä oli neljä silmämääräisesti havaittavaa radassa syntynyttä halkeamaa. Ero murtokuormassa saattaa kuitenkin selittyä pölkkyissä esiintyvillä lujuuseroilla ja näin ollen pienempi murtokuorma ei välttämättä johdu väsymisestä.

Kuormituskokeiden jälkeen radassa haljenneista ratapölkkyistä piikattiin ylimmät punokset näkyviin radassa syntyneiden halkeamien kohdalta mahdollisten korroosion aiheuttamien vaurioiden havaitsemiseksi. Haljenneiden pölkkyjen punoksissa ei kuitenkaan havaittu silmämääräisesti korroosion merkkejä, kuten seuraavista kuvista 2.58 ja 2.59 voidaan havaita.



Kuva 2.58 Radassa haljenneen pölkyn ylimmät punokset kahden radassa syntyneen halkeaman kohdalta.



Kuva 2.59 Radassa haljenneen pölkyn ylimmät punokset yhden radassa syntyneen halkeaman kohdalta.

2.6.6 Vertailulaskelmat

2.6.6.1 Staattiset kuormituskokeet

Betoniratapölkyn kestävyys halkeilurajatilassa ja murtorajatilassa on esitetty kohdassa 2.3.6 .

Betoniratapölkyn keskikohdan taulukoissa 2.24 ja 2.25 esitetyt koekuormituksissa saavutetut taivutusmomentit laskettiin keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliille $L=1,6\text{m}$ seuraavasti: $M = FL/4 = 0,4\text{m} \cdot F$. Kuormitus ratapölkkyjen yläpintaan välitettiin 100 mm leveän teräslevyn välityksellä, siksi momentin suuruus lasketaan myös lausekkeella $M = 0,38\text{m} \cdot F$.

Taulukko 2.24 Betoniratapölkyn keskiosan staattisten kuormituskokeiden tulokset (Rantala 2010) ja laskennallinen vertailu.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama, taiv.momentti M_{halkeama} [kNm]			Murtoa vastaava taiv.momentti M_{murto} [kNm]		
	Laskenta	Koekuorm $e=0,4\text{m}$	Koekuorm $e=0,38\text{m}$	Laskenta	Koekuorm $e=0,4\text{m}$	Koekuorm $e=0,38\text{m}$
BV75 (koe 19)	13,1	-	-	29,3	50,0	47,5
BV75 (koe 20)	13,1	-	-	29,3	47,2	44,8
BV75 (koe 21)	13,1	-	-	29,3	47,2	44,8
BV75 (koe 22)	13,1	-	-	29,3	50,4	47,9
BV75 (koe 23)	13,1	-	-	29,3	45,6	43,3
BV75 (koe 24)	13,1	-	-	29,3	49,6	47,1
BV75 (koe 25)	13,1	18,0	17,1	29,3	53,2	50,5
B75 (koe 26)	12,4	-	-	26,4	32,4	30,8
B63 (koe 27)	12,4	18,0	17,1	26,4	37,2	35,3
B63 (koe 28)	12,4	14,0	13,3	26,4	35,2	33,4
B97 (koe 29)	14,6	18,0	17,1	32,8	41,2	39,1
B97 (koe 30)	14,6	20,0	19,0	32,8	43,6	41,4
BP99 (koe 31)	15,2	18,0	17,1	33,7	40,0	38,0
BP99 (koe 32)	15,2	20,0	19,0	33,7	40,8	38,8

Kuormituskokeissa saavutettu ensimmäistä halkeamaa vastaava taivutusmomentti oli suurempi kuin laskennallinen vertailuarvo. Keskimäärin BV75-pölkkyllä ero oli 34 %, B63-pölkkyillä 26 % ja uusilla pölkkyillä 24 %.

Myös murtomomentti oli kuormituskokeissa suurempi kuin laskennallinen vertailuarvo. Keskimäärin BV75-pölkkyillä ero oli 63 %, B63-pölkkyillä 34 % ja uusilla pölkkyillä 21 %. Kun uusien ratapölkkyjen kuormituskokeiden murtomomentti määritettiin momenttivarrella $e=0,38\text{m}$, ero laskennalliseen vertailuarvoon oli vain 18 %.

Tämänhetkinen suomalainen vaatimus (RHK 2008) betoniratapölkyn keskiosan taivutusmomenttikestävyydelle on $M_{\text{Rd}} = 2 \cdot M_{\text{RK}} = 2 \cdot 12 \text{ kNm} = 24 \text{ kNm}$. Kaikki laskenta- ja koetulokset täyttävät tämän vaatimuksen.

Taulukko 2.25 Koekuormituksissa saavutetut taivutusmomenttien keskiarvot.

Ratapölkkytyyppi	Ensimmäinen halkeama, taiv.momentti M_{halkeama} [kNm]		Murtoa vastaava taiv.momentti M_{murto} [kNm]	
	Koekuorm $e=0,4\text{m}$	Koekuorm $e=0,38\text{m}$	Koekuorm $e=0,4\text{m}$	Koekuorm $e=0,38\text{m}$
BV75	18,0	17,1	49,0	46,6
B63	16,0	15,2	36,2	34,4
B97	19,0	18,1	42,4	40,3
BP99	19,0	18,1	40,4	38,4

Ratapölkyn BP99 suurin kuormituskokeissa saavutettu pistekuorma oli 106 kN. Vastaava tukireaktio ja leikkausvoima oli $V_{\max, \text{kokeet}} = 53$ kN. Tämä jäi siis laskennallista leikkauskestävyyttä ($V_{c,u} = 56$ kN kiskonkiinnitysuran kohdalla) pienemmäksi taivutusmurtotilanteessa.

2.6.6.2 Väsytytkuormituskokeet

Taulukossa 2.26 esitettävät betoniratapölkyn keskiosan väsytytkuormituskokeiden taivutusmomentit keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliä $L=1,6$ m lasketaan seuraavasti: $M = F \cdot (L - 0,08 \text{ m}) / 4 = 0,38 \text{ m} \cdot F$. Ratapölkkyjen yläpinnalla kuormitus välitettiin 100 mm leveän teräslevyn välityksellä.

Taulukko 2.26 Pölkyn keskiosan väsytytkuormituskokeita vastaavat taivutusmomentit.

Kokeen numero	Väsytytkuorma	Toistuva taivutusmomentti [kNm]
6	BP99 (Väsytytkuorma 37 kN)	14
7	BP99 (Väsytytkuorma 55 kN)	21
5	BP99 (Väsytytkuorma 70 kN)	27

Parman ratapölkyn BP99 halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti kohdan 2.3.6 mukaan ratapölkyn keskikohdalla on $M_{R, \text{halkeilu}} = 15,2$ kNm. Vastaavasti taivutusmurtomomentti $M_{R, \text{murto}} = 33,7$ kNm. Kokeessa 6 ratapölkky ei siis haljennut ja kokeissa 5 ja 7 ratapölkyn toiminta vastasi halkeilurajatilan jälkeistä rakenteen toimintaa. Kokeessa 5 kuormitus vastasi 80 % laskennallisen taivutusmurtomomentin arvosta.

2.7 Yhteenveto

2.7.1 Pölkyn pään kuormituskäyttäytyminen

Käyttämättömien ratapölkkyjen B97:n ja BP99:n staattisessa pölkyn pään kuormituskokeessa saadut kuormitustasot pysyvä 0,05 mm halkeaman syntymiselle vaihtelivat 310–400 kN välillä, kun taas BV75-ratapölkkyissä pysyvä halkeama muodostui keskimäärin hieman suuremmalla kuormitustasolla. Kuormat olivat tuolloin 370–460 kN pölkystä riippuen. Selkeästi kuormituskestävyydeltään heikommalla ratapölkkytyypillä B63 ja B75 vaativat 200–250 kN kuorman ennen pysyvän 0,05 mm halkeaman muodostumista. Vastaavasti murtokuorma vaihteli B97- ja BP99- pölkkyillä 480–565 kN välillä kun taas BV75-pölkkyillä murtokuorma vaihteli 465–548 kN välillä. Selkeästi heikoimpina olivat B63- ja B75-pölkkyt, joiden murtokuorma vaihteli 300–397 kN välillä.

Dynaamisissa pölkyn pään kuormituskokeissa kuormituskoetulokset olivat staattisiin kuormituskokeisiin verrattuna pienempiä. B97- ja BP99-ratapölkkyissä pysyvä leveydeltään 0,05 mm halkeama syntyi 290 kN kuormitustasolla ja murto tapahtui 390–430 kN kuormitustasolla. Kuormitustasot BV75-pölkkyillä olivat 230–270 kN 0,05 mm pysyvän halkeaman muodostuessa ja 310–390 kN murron tapahtuessa. Kuormituskokeissa BV75-ratapölkkyjen kuormituskoetuloksissa oli suuri hajonta. Halkeaman merkitystä ei voida luotettavasti arvioida dynaamisen pölkynpään kuormituskokeen osalta, sillä testatut pölkkyt määrät olivat vähäiset. Varovainen arvio voidaan kuitenkin esittää, sillä alhaisemman tuloksen antaneissa ratapölkkyissä olemassa ollut halkeama

oli pituudeltaan selkeästi pidempi verrattuna toiseen BV75- ratapölkkyyn. Edellä mainitusta johtuen halkeaman pituudella saattaa olla suurtakin merkitystä ratapölkyn ollessa suurten dynaamisten kuormien alaisena.

Pölkyn pään kuormituskokeiden aikana mitatuissa venymissä ensimmäisen halkeaman syntyessä oli vaihtelua pölkkytyypistä riippuen. B97-pölkkyissä ensimmäinen halkeama havaittiin kiskon lepopinnan kohdalla venymien ollessa noin 350-400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Vastaavasti BP99-pölkkyissä mitatut venymät olivat tuolloin noin 420-470 $\mu\text{m}/\text{m}$. Venymämittaustulosten perusteella BP99-ratapölkky kestää hieman suurempia betonin venymiä verrattuna B97-ratapölkkyyn.

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa kaikki testatut pölkkyt olivat käyttämättömiä B97-pölkkyjä. Kyseisten pölkkyjen staattinen murtokuorma on noin 340 kN, tukivälin ollessa 800 mm. Väsytytkuormitustason ollessa 150 kN 200 000 sykliä alensivat staattista murtokuormaa noin 10 kN ja väsytytkuormitustason ollessa 170 kN staattinen murtokuorma oli alentunut noin 25 kN. Alentuneet murtokuormat voivat ainakin osittain selittyä pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Kokeissa selkeää väsymistä havaittiin kuormitustason ollessa noin 200 kN. Ratapölkkyt murtuivat alle 200 000 kuormitussyklin aikana, kun kuormitustaso oli 195 kN tai enemmän. Selkeä poikkeus oli 190 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky. Väsytytkuormituskokeen jälkeen tehdyssä staattisessa kokeessa murtokuorma oli noin 340 kN, joten murtokuorma ei ollut laskenut lainkaan verrattuna väsytytkuormittamattomaan pölkkyyn. Näin ollen 190 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky voidaan olettaa poikkeuksellisen kestäväksi varsinkin kun 195 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky murtui noin 150 000 väsytytkuormitussyklin jälkeen. Väsytytkuormituskokeiden tulosten perusteella luotiin ratapölkyn kohtaaman rasitustason ja pölkyn kestäjän kuormituskertamäärän välistä yhteyttä kuvaava väsymismalli.

Pölkkyille, jotka eivät murtuneet väsytytkuormitussykliä aikana, tehtiin staattiset kuormituskokeet. Halkeilemattomien pölkkyjen taipuma oli 150 kN kuormitustasolla noin 0,3 mm ja väsytytkuormituskokeissa haljenneiden pölkkyjen taipuma vaihteli välillä 0,4-0,5 mm. Pölkkyjen taipuma murren yhteydessä oli noin 6-10 mm pölkystä riippuen.

Vartiuksen radasta poistetuille kunnoltaan eritasoisille pölkkyille tehdyissä kuormituskokeissa murtokuormat olivat BV69-pölkkyillä 325-358 kN ja B75-pölkkyillä 341-410 kN. Tukiväli kokeissa oli 600 mm. Aikaisemmin kuormitettujen BV75-pölkkyjen murtokuormat vaihtelivat 465-548 kN välillä. BV75-pölkkyt ovat kiskon kohdalta alle 10 mm korkeampia kuin BV69-pölkkyt ja punosten määrä ja sijoittelu on molemmissa pölkkyissä sama. Silti silmämääräisesti hyväkuntoisten BV69-pölkkyjen murtokuormat olivat selkeästi BV75-pölkkyjä pienemmät. B75-pölkkyjen murtokuormat olivat samaa suuruusluokkaa kuin aikaisemmin SFS-EN 13230-2 mukaisesti tehdyissä staattisissa kuormituskokeissa. Murtokuormien suuruudella ei ollut selkeää yhteyttä pölkkyjen silmämääräisesti arvioituun kuntoon. Silmämääräisesti heikkokuntoisimmaksi arvioidulla B75 pölkkyllä oli pienin murtokuorma, mutta silmämääräisesti lievästi vaurioituneeksi arvioidulla B75-pölkkyllä oli suurin murtokuorma.

Vartiuksen BV69-pölkkyjen taipuma 150 kN kuormitustasolla oli noin 0,4 mm ja B75-pölkkyjen taipuma oli noin 0,4-0,55 mm pölkystä riippuen. Murren yhteydessä BV69 pölkkyjen taipuma oli noin 4 mm. B75-pölkkyjen käyttäytyminen erosi pölkyn pään osalta merkittävästi muista testatuista pölkkyistä. Murren yhteydessä taipumat olivat erittäin suuria vaihdellen noin 17 mm:stä aina yli 35 mm:iin. Erittäin suuret taipumat selittyvät ainakin osittain B75-pölkkyjen valmistusmenetelmästä. B75-pölkkyt on val-

mistettu jälkijännitystekniikalla, kun taas muut testatut pölkyt on valmistettu esijännittämällä. Esijännitetyissä pölkyissä punoksen tartunnan pitää toimia lyhyellä matkalla, joten teräs pääsee venymään vain suhteellisen lyhyeltä matkalta. Jälkijännitetyissä pölkyissä on sileät terästangot, jotka on ankkuroitu pölkyyn molempiin päihin. Sileän tangon tartunta betoniin on selkeästi heikompi kuin punoksen tartunta. Tällöin teräs pääsee venymään huomattavasti pidemmältä matkalta jolloin taipuma voi myös kasvaa suuremmaksi.

Yhteenvetona pölkyyn pään kuormituskokeiden osalta voidaan todeta, että B97- ja BP99-ratapölkyt täyttivät standardin SFS-EN 13230-2 asettamat kriteerit hyvin ja BV75-ratapölkyt niiden ikä huomioiden erittäin hyvin. B63- ja B75-pölkyt kestivät selkeästi heikommin muihin testattuihin pölkkyytyyppeihin verrattuna, mutta silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden niidenkin kuormankantokyky oli vähintäänkin tyydyttävä. Lisäksi väsytyskuormituskokeiden perusteella nykyään valmistettavien pölkyjen väsyttämiseen vaadittava kuorma on jonkin verran suurempi verrattuna kuormiin, joita esiintyy radalla.

2.7.2 Pölkyyn keskiosan kuormituskäyttäytyminen

Standardiin SFS-EN 13230-2 pohjautuvissa ratapölkyyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa B97- ja BP99-ratapölkyt täyttivät standardin asettamat kriteerit. Ensimmäistä halkeamaa vastaava kuormitustaso vaihteli 45-50 kN välillä ja murtokuorma vaihteli 100-109 kN välillä. Murtokuorman perusteella arvioitaessa kestävin pölkkyytystyyppi oli BV75, minkä murtokuorma oli välillä 114-133 kN. BV75-ratapölkyissä oli yhtä poikkeusta lukuun ottamatta käytön aikana syntyneitä halkeamia, joten kuormitustaso jolla ensimmäiset halkeamat syntyvät on vaikeasti arvioitavissa. Kuten pölkyyn pään kuormituskokeissa, selkeästi heikoimmat ratapölkkyytyypit olivat B63 ja B75. Kyseisten pölkyjen murtokuormat vaihtelivat 81-93 kN välillä. Mainittavaa on kuitenkin, että kyseiset pölkyt olivat kuormien alla käyttäytymiseltään hyvin samanlaisia aina 60 kN asti verrattuna muihin kuormitettuihin pölkkyytyyppeihin.

Ratapölkyyn keskiosan dynaamisista kuormituskokeista saadut tulokset eivät eronneet merkittävästi keskiosan staattisista kuormituskokeista saatuihin tuloksiin. Vähäisestä testausmäärästä huolimatta voidaan kuitenkin esittää arvio, että kuormituskokeissa dynaamisten kuormien merkitys ratapölkyyn keskiosaan ei ole yhtä merkittävä kuin dynaamisten kuormien merkitys pölkyyn päähän.

Ratapölkyyn keskiosan kuormituskokeissa muodostuneissa taipumissa huomion-arvoista on taipuma, joka vaaditaan halkeaman muodostumiseen. Kokeissa saatujen taipumatulosten perusteella jo noin yhden millimetrin taipuma riittää aikaansaamaan halkeaman pölkyyn keskelle. Epätasaisen routanousun tai muutoin ratapenkereen ominaisuuksien heiketessä yhden millimetrin taipuman muodostuminen ratapölkyyn todellisissa olosuhteissa on mahdollista tai jopa todennäköistä.

Ratapölkyyn keskiosan kuormituskokeissa venymät olivat ensimmäisen halkeaman muodostuessa B97-ratapölkyllä noin 420-500 $\mu\text{m}/\text{m}$ ja BP99-ratapölkyissä noin 480-580 $\mu\text{m}/\text{m}$. B63-, B75- ja BV75-ratapölkyissä mitatut venymät vaihtelivat ensimmäisen halkeaman havainnointihetkellä noin 350-500 $\mu\text{m}/\text{m}$ välillä. Mitatut venymät ovat hieman suurempia verrattuna pölkyyn pään kuormituskokeisiin. Tämä selittyy kuitenkin suuremmasta esijännityksen aiheuttamasta betonin puristumasta ratapölkyyn keskellä. Tällöin pölkyyn keskiosaan syntyy hieman suuremmat venymät ennen ensimmäistä halkeamaa.

Pölkyn keskiosan väsytytkuormituskokeissa kuormitettavana oli BP99-pölkkyjä. Selkeää väsymistä tapahtui 70 kN kuormitustasolla. Tuolloin hieman alle 200 000 syklin kohdalla meni yksittäisiä punoksen lankoja poikki. Väsyminen voitiin havaita 200 000 syklin jälkeen tehdyssä staattisessa kuormituskokeessa murtokuorman alentumisena. Murtokuorma oli alentunut noin 20 kN. Sen sijaan 37 kN ja 55 kN kuormitustasoilla tehdyt väsytytkuormituskokeet eivät vaikuttaneet staattisten murtokuormien suuruuteen. Myös staattisissa kokeissa mitattujen taipumien perusteella voidaan havaita väsyminen 70 kN kuormitustasolla tehdyssä väsytytkuormituskokeessa. Kuormitustason ollessa 50 kN olivat 37 kN ja 55 kN väsytytkuormitustasoilla kuormitettujen pölkkyjen taipumat 1-1,2 mm. Hieman suurempi taipuma 55 kN väsytytkuormitustasolla kuormitetussa pölkkyssä selittyy suurelta osin väsytytkuormituskokeiden aikana syntyneillä halkeamilla. Sen sijaan 70 kN väsytytkuormitustasolla kuormitetun pölkyn taipumat olivat staattisessa kuormituskokeessa 50 kN kuormitustasolla yli 2 mm eli noin kaksinkertaiset, verrattuna pienemmillä väsytytkuormitustasoilla kuormitettuihin pölkkyihin. Murron yhteydessä pölkkyjen taipumat olivat hieman noin 15-20 mm. Väsyminen voidaan havaita myös taipumien kasvamisena väsytytkuormitus syklien aikana. Väsytytkuormitustason ollessa 37 kN taipumat pysyivät lähes samana koko kokeen ajan ja 55 kN kuormitustasolla kuorman aiheuttama taipuma kasvoi noin 0,2 mm kuormituskokeen aikana. Sen sijaan 70 kN kuormitustasolla kuormitetun pölkyn taipumat kasvoivat kokeen aikana noin 1,7 mm, mikä viittaa selkeään väsymiseen.

Vartiuksen radasta poistetuille kunnoltaan eritasoisille pölkkyille tehdyissä kuormituskokeissa murtokuormat olivat BV69-pölkkyllä 102 kN ja B75-pölkkyillä hieman yli 90 kN. B75 pölkkyjen murtokuormat ovat samaa suuruusluokkaa kuin aikaisemmin samantyyppisille pölkkyille standardin SFS-EN 13230-2 mukaan tehdyissä staattisissa kuormituskokeissa. SFS-EN 13230-2 mukaisissa staattisissa kuormituskokeissa BV75-pölkkyille saatu murtokuorma vaihteli 114-133 kN välillä. BV75 pölkkyjen keskeellä on sama punosmäärä ja poikkileikkaus kuin BV69-pölkkyillä. Silti BV69 pölkyn murtokuorma oli jonkin verran BV75-pölkkyä pienempi. Huomion arvoista on kuitenkin se, että lähes 40 vuotta radassa olleen BV69 pölkyn murtokuorma oli samaa suuruusluokkaa verrattuna nykyään rataverkolle hankittaviin B97 ja BP99 pölkkyihin.

Yhteenvedona ratapölkyn keskiosan kuormituskokeista voidaan todeta, että ratapölkyn keskiosan kuormituskokeiden perusteella BV75-pölkkyt ovat vähintään yhtä kestäviä kuin nykyään Suomen rataverkolle hankittavat B97- ja BP99-pölkkyt. Myös B63- ja B75-ratapölkkyt kestivät niiden silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden yllättävän hyvin pölkyn keskiosan kuormituskokeet.

3 Ratapölkyn toiminta radassa

3.1 Raiteen pituus- ja poikittaissuuntaisen vastuksen määrittäminen

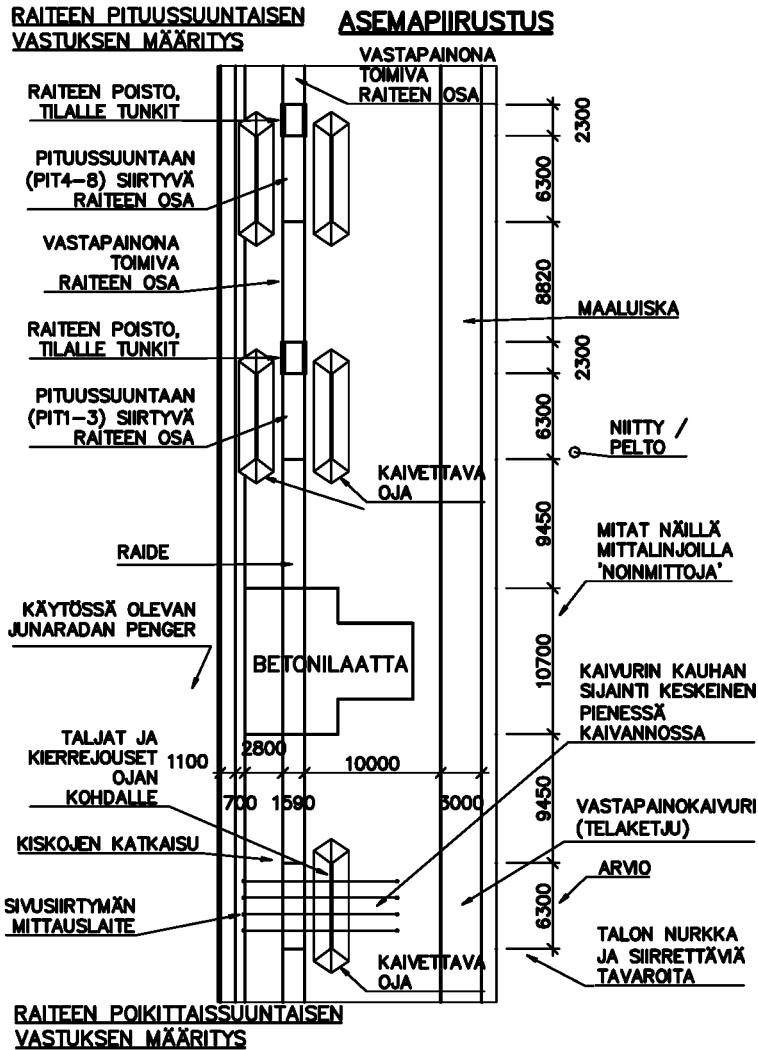
3.1.1 Koejärjestelyt Mellilän ratapihalla

3.1.1.1 Koejärjestelyjen yleisesittely

Rautateillä Suomessa ja monessa muussa maassa on käytetty jatkuvakiskoraiteita jo usean vuosikymmenen ajan. Ratapenkereen päällä jatkuvakiskoraide ei radan pituussuunnassa pääse venymään eikä puristumaan. Rautatiesillat muodostavat radan pohjarakenteena epäjatkuvuuskohdan, koska ne toimivat lämpötilavaihteluiden seurauksena raiteen alla eri tavalla kuin ratapenger.

Monissa ulkomaisissa suunnitteluohjeissa on määritetty kiskojen ja sillan kannen välisen epälineaarisen vaakajousen arvot. Suomessa tällaista määrittelyä ei ole aiemmin tehty ja yksi tämän tutkimuksen tavoitteista olikin määrittellä jouselle arvot sekä alkuvaiheen kimmoisessa vaiheessa että plastisella alueella, jotta laskelmilla voitaisiin arvioida sillan ja raiteen muodostaman kokonaisuuden toimintaa. Tästä lähtökohdasta kesällä 2007 Mellilän ratapiha-alueella toteutetun koeohjelman päätavoitteena oli löytää koekuormitusten avulla todellisesta rakenteesta mitattuna sekä raiteen pituus- että poikittaissuuntaisen vastuksen arvot.

Kuormituskohtia Mellilässä oli kolme, kaksi pituussuuntaisessa kuormituksessa ja yksi poikittaissuuntaisessa kuormituksessa. Koekuormitusta varten jokaisessa kuormituskohdassa raide katkaistiin 6-7 m pituiseksi kuvassa 3.1 esitetyn ratapiha-aluepiirroksen mukaisesti.



Kuva 3.1 Koekuormitusten sijainnit Mellilän ratapihalla.

Pituussuuntaisessa kuormituksessa raidetta kuormitettiin kahden tunkin avulla vetäen yhteensä 8 kertaa kahdella erityyppisellä kuormitusjärjestelyllä. Pystykuormittamattomana raide tavoitti plastisen liiketilan aksiaalisen kuormitusten seurauksena. Pystykuormitettuna kiskot luistivat lopulta kiinnitysten suhteen ja raiteen tukikerroksen murtotilaa ei tavoitettu. Tulokset on ilmoitettu vaaka- ja pystysiirtyminä ja kiskojännityksinä eri kohdissa raidetta kuormitusten eri vaiheissa. Pituussuuntaisen kuormituksen tulokset on lisäksi koottu taulukoihin, joissa esitetään raiteen liiketilan alkuvaiheen jäykkyys kimmoiseksi tulkittuna sekä plastisen vaiheen kapasiteettiarvo eli raidevastusarvo pituusmetriä kohden laskettuna.

Poikittaisessa kuormituksessa raidetta kuormitettiin kaivurin kauhan avulla vaakasuuntaan vetäen yhteensä 5 kertaa kolmella erityyppisellä kuormitusjärjestelyllä. Kuormitusten seurauksena raide käyrystyi selvästi. Tulokset on ilmoitettu siirtyminä eri kohdissa raidetta kuormituksen eri vaiheissa.

Tutkimusosio on raportoitu yksityiskohtaisemmin lähteessä Kerokoski (2007)

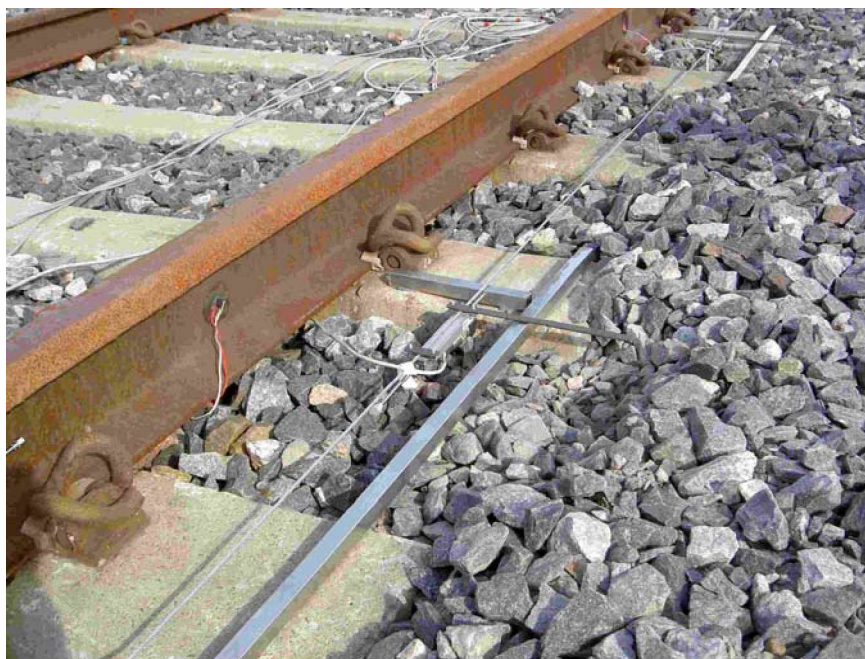
3.1.1.2 Mittalaitteet

Novotechnik TRS 100 -siirtymäanturit kalibroitiin TTY:n rakennushallissa. Kertoimeksi saatiin 8,3815 mm/V. Pienemmän mittausalueen siirtymämittaria TRS 25 ei erikseen kalibroitu. Pituussuuntaisessa kuormituksessa käytettiin TTY:n rakennusosaston voima-antureita, jotka myös kalibroitiin. Kiskojen venymät mitattiin liimattavilla venymäliuskoilla.

3.1.1.3 Koejärjestelyt, raiteen pituussuuntaiset koekuormitukset

Kiskon venymien avulla voidaan arvioida kiskon aksiaalista voimaa eri kohdissa. Venymät on muutettu kiskojännityksiksi teräksen kimmomoduulin $E_{\text{teräs,kisko}} = 210\,000$ MPa perusteella lausekkeella $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Kiskojännitys puolestaan voidaan muuttaa voimaksi lausekkeella $F = \sigma \cdot A$, kun arvioidaan, että tarkastelun kohteena on profiilin painopisteen venymä, jolloin taivutusmomentti ei vaikuta teräsjännityksiin. Tällöin lasketaan voima $F = \sigma \cdot A = \sigma \cdot 6977 \text{ mm}^2$, jossa A = kiskon UIC54 poikkileikkausala. Kiskon venymä mitattiin viidessä peräkkäisessä kohdassa niityn puoleisesta kiskosta (kuva 3.2). Venymäliuskat liimattiin mahdollisimman tarkasti kiskoprofiilin painopisteeseen. Venymäliuska 1 sijaitsi lähimpänä tunkkeja ja liuska 5 kauimpana. Keskinäiset etäisyydet olivat: 1-4: 1,25 m ja 4-5: 1,9 m.

Pituussuuntainen siirtymä mitattiin raiteen molemmilta puolilta. Anturit 1 ja 2 sijaitsivat raiteen vasemmalla puolella ja anturit 3-5 oikealla puolella. Anturit 1 ja 3 sijaitsivat kauimpana tunkeista ja 2 ja 5 lähimpänä.



Kuva 3.2 Siirtymämittarit kiinnitettiin kireään teräsvaijeriin ja tuettiin kiertymätömiksi.

Työntävät tunkit muutettiin vetäviksi vetotankojen avulla kuvassa 3.3 esitetyllä tavalla.



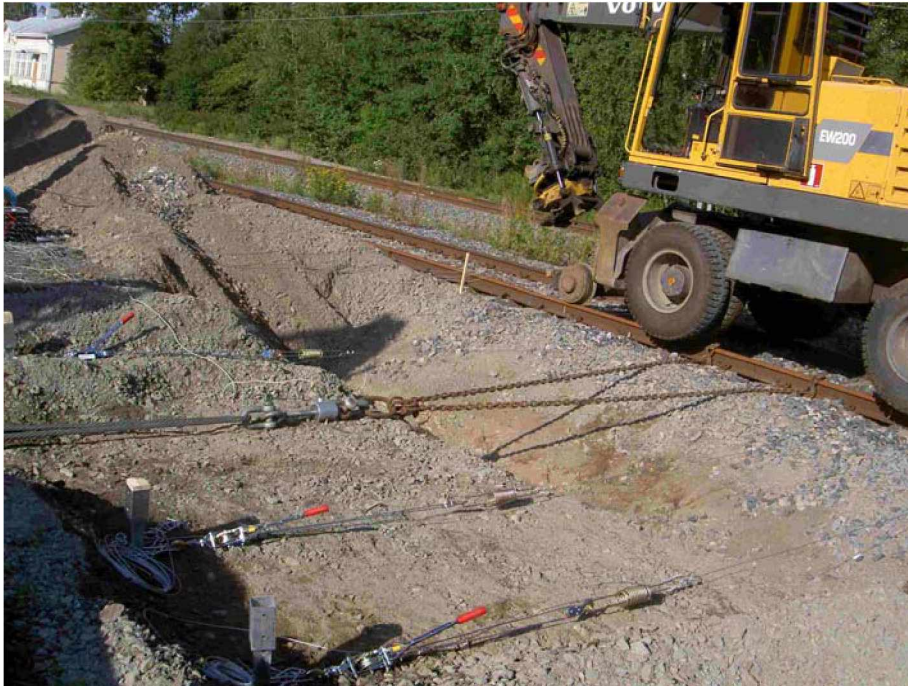
Kuva 3.3 Raiteen pituussuuntaisen kokeen koejärjestelyt: tunkit ennen koekuormituksia 14.9.2007.

Kiskon päässä mitattiin sekä pituussuuntaisen (anturi 6) että pystysuuntaisen siirtymän suuruus. Pystysuuntaisen siirtymän mittauksen avulla on tarkoitus arvioida raidepelin dilataation suuruutta sekä pystykuormittamattomassa että pystykuormitetussa raiteen suuntaisessa koekuormituksessa (kuva 3.4).



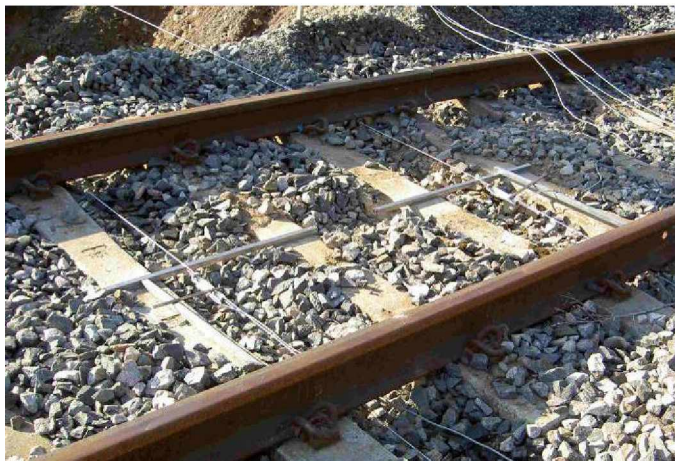
Kuva 3.4 Jatkuva pystysuuntainen kuorma PIT 4 – PIT 8:ssa järjestettiin 17 teräsbetonipaalun avulla.

Kuormitukset PIT 1 – PIT 3: ilman pystykuormitusta (lyhenteet: pituussuuntainen kuormitus 1 = PIT 1 jne.).



Kuva 3.6 Kuormitukset POK 3 - POK 4, ketjut voima-anturin ja lähimmän kiskon välillä.

Poikittaisia siirtymiä mitattiin neljällä siirtymämittarilla. Mittarit nimettiin seuraavasti: Anturi 1, Anturi 2, Anturi 3 ja Anturi 4. Keskinäiset välit olivat 1,26m + 2,52m + 1,26m ja äärimmäisten mittareiden väli täten noin 5 m. Siirtymämittarit (kuva 3.7) kiinnitettiin raiteen suhteen poikittaisten kiinnitysvaijereiden alapintaan. Niillä mitattiin ratapölkkyjen siirtymiä raiteen poikkisuuntaan.



Kuva 3.7 Siirtymäanturit asennettuina.

Edellisen kuormituksen jälkeen seuraavassa kuormituksessa siirtymä- ja voimamittaus aloitettiin edellisen kuormituksen jäännössiirtymästä uudelleen pitäen jäännössiirtymää nolla-arvona.

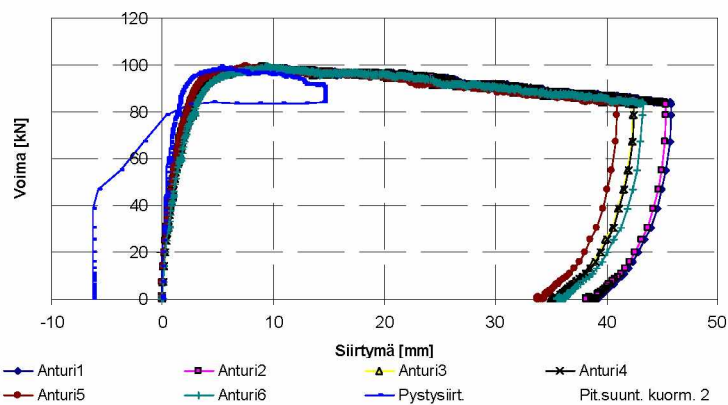
3.1.2 Pituussuuntaisten kuormitusten mittaustulokset

3.1.2.1 Pituussuuntainen kuormitus 1

Ratapölkkyjen mitattu maksimisiirtymä oli keskimäärin 6 mm noin 90 kN voimalla. Kuormituksen poiston jälkeen ratapölkkyjen palautumattomaksi raiteen suuntaiseksi siirtymäksi jäi keskimäärin 3 mm. Kiskon pään pystysiirtymä oli vakio, noin 0,5 mm, jo hyvin pienellä vaakakuormalla.

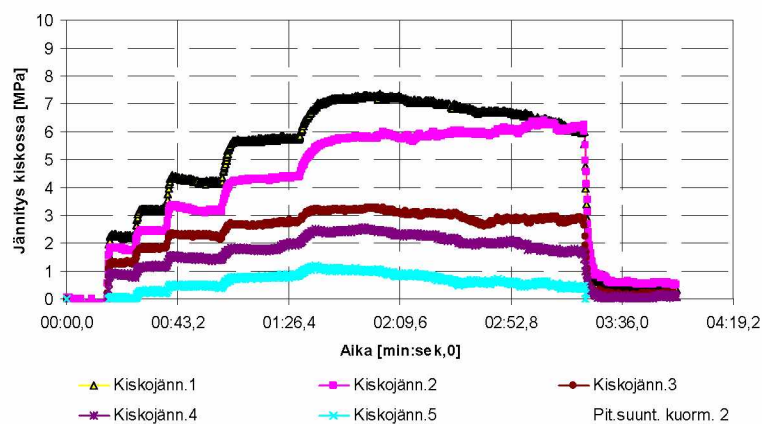
3.1.2.2 Pituussuuntainen kuormitus 2

Voimaa kasvatettiin portaittain. Voiman 99 kN kohdalla voima alkoi hieman pienentyä, mutta siirtymä lähti selvään kasvuun. Voidaankin tulkita, että raide saavutti murto-tilan ja, jos kuormitus olisi pidetty vakiona maksimiarvossaan, olisi siirtymä todennäköisesti jatkanut kasvamistaan. Pituussuuntaisten siirtymien hajonta oli pienempi kuin ensimmäisessä kuormituksessa. Jäännössiirtymä oli noin 35 mm (kuva 3.8).



Kuva 3.8 Siirtymä-voima-kuvaaja.

Suuren siirtymätilan aikana kiskojäännitys kohdassa 2 kasvoi kuvan 3.9 mukaisesti, vaikka muissa kohdissa pieneni. Syynä ovat todennäköisesti paikalliset jäykkyyserot raidesepelikerroksessa ja kiskonkiinnityksessä.



Kuva 3.9 Aika-kiskojäännitys-kuvaaja.

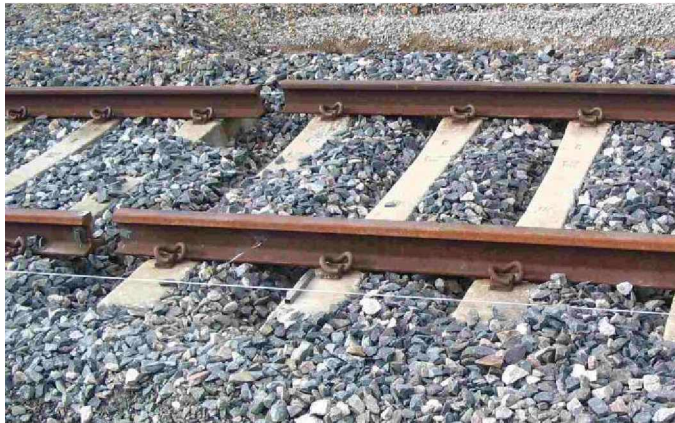
Kokeen PIT 2 jälkeen mitatut kiskon liukumien ratapölkkyjen suhteen tunkkien puoleisessa päässä on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Mitatut liukumat pystykuormittamattomassa kiskossa.

Kiskon mitatut liukumat	Vasen kisko [mm]	Oikea kisko [mm]
1. ratapölkky	1	3
2. ratapölkky	0	3
3. ratapölkky	1	7
4. ratapölkky	0	1
5. ratapölkky	-	0
10. ratapölkky	0	< 1

3.1.2.3 Pituussuuntainen kuormitus 3

PIT 3:ssa raidetta vedettiin noin 78 mm matka noin 6 minuutin aikana. Mitattu suurin voima oli noin 83 kN. Muodonmuutokset sepelikerroksen pinnassa ratapölkkyjen välissä ovat selvästi nähtävissä kuvassa 3.10.



Kuva 3.10 Tilanne viimeisen pystykuormittamattoman kokeen jälkeen.

3.1.2.4 Pituussuuntainen kuormitus 4

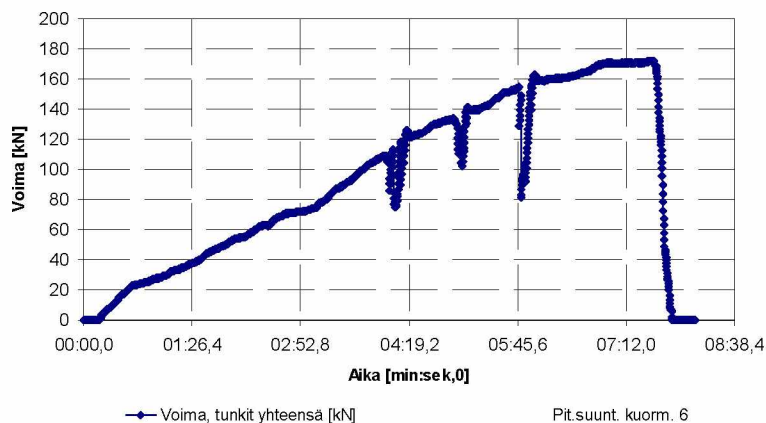
PIT 4 oli ensimmäinen pystykuormitettu pituussuuntainen kuormitus ja se kesti vain noin 13 sekuntia. Kuvaajissa esitetyistä tuloksista havaitaan, että ratapölkkyjen yläpintojen vaakasiirtymissä oli hajontaa. Kiskon pää, anturi 6, liikkui enemmän kuin ratapölkkyt ja myös palautui lähemmäksi lähtötilannetta. Maksimi vaakasiirtymä oli noin 0,22 mm vaakavoimalla 39 kN. Kiskon suhteellinen pystysiirtymä oli selvästi pienempi kuin pystykuormittamattomalla raiteella, 12 % vaakasiirtymästä maksimi-voimalla.

3.1.2.5 Pituussuuntainen kuormitus 5

Kuormitusta lisättiin tunkkien avulla melko tasaisesti kuormitustapauksen maksimi-voimaan asti. Maksimivoimalla 83 kN kiskon ulomman pään vaakasiirtymä oli 0,6 mm ja pystysiirtymä 0,12 mm.

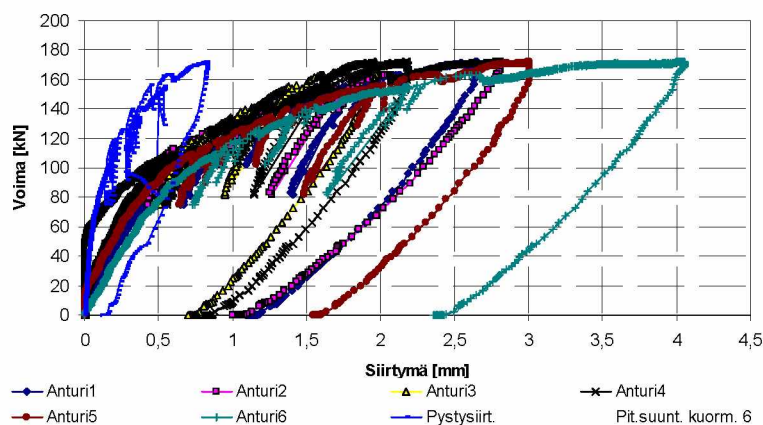
3.1.2.6 Pituussuuntainen kuormitus 6

Kuormaa lisättiin vetotunkkien avulla tasaisesti ajan funktiona kuvan 3.11.mukaisesti, kuitenkin siten, että kolme kertaa kuormitusta välillä pienennettiin selvästi ja palautettiin 10–15 sekunnin jälkeen takaisin.



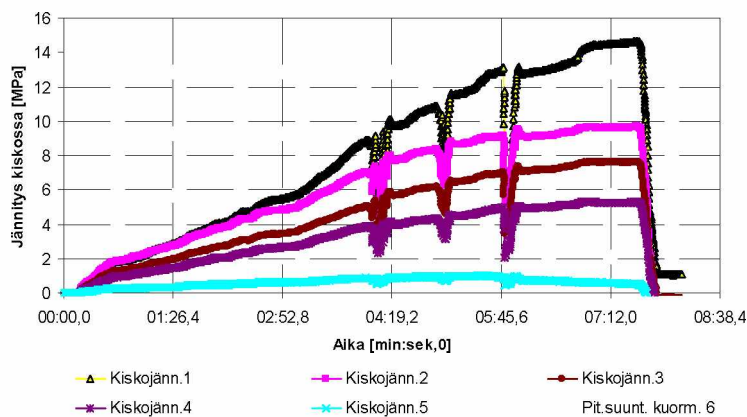
Kuva 3.11 Aika-voima-kuvaaja.

Kuormitustapauksessa PIT 6 vaakavoima oli suuri, mutta kisko pysyi vielä kiskonkiinnitysten avulla kiinni ratapölkkyissä. Kiskon siirtymä oli kuitenkin jo selvästi suurempi kuin ratapölkkyjen siirtymät (kuva 3.12). Tunkkeja lähimpänä sijainneet ratapölkkyt liikkuvat enemmän kuin kauimmaisat ratapölkkyt.



Kuva 3.12 Siirtymä-voima-kuvaaja.

Kuormituksen lisäys-poisto-sykli näkyvät siirtymäkuvaajissa, mutta vielä selvemmin ne näkyvät kiskojännityksissä (kuva 3.13). Kiskojännitys pieneni miltei lineaarisesti etäisyyden tunkeista kasvaessa.



Kuva 3.13 Aika-kiskojännitys-kuvaaja.

Vertailulaskelmien mukaan (tapaukset PIT 4 – PIT 8) Kiskojännitys 1:ssä taivutusmomentti kasvatti kiskon aksiaalista teräsjännitystä noin 20 % eli venymäliuska oli virheellisesti kiinnitetty hieman kiskoprofiilin neutraaliakselin ylä- tai alapuolelle.

3.1.2.7 Pituussuuntainen kuormitus 7

Ennen raiteen murtoon asti kuormittamista tehtiin vielä yksi pienehkön voiman kuormitus. Koska kuorma oli miltei puolet pienempi kuin edellisellä kerralla, jäivät sekä siirtymät että varsinkin jäännössiirtymät pieniksi.

3.1.2.8 Pituussuuntainen kuormitus 8

PIT 8:ssa raide kuormitettiin suurimmalla raiderakenteen kestämillä kuormalla. Oikeanpuoleinen kisko (anturi 6) siirtyi maksimikuormituksen 208 kN jälkeen huomattavasti enemmän kuin ratapölkky (anturit 1-5). Syynä oli kiskon luistaminen ratapölkyn suhteen (taulukko 3.2). Vasemman kiskon kiinnitysten läpivetovastus oli suurempi kuin oikean kiskon.

Taulukko 3.2 Mitatut liukumat pystykuormitetuissa kiskoissa, tunkkien puoleiset pölkkyt.

	Vasen kisko [mm]	Oikea kisko [mm]
1. ratapölkky	95	140
10. ratapölkky	(ei mitattu)	143

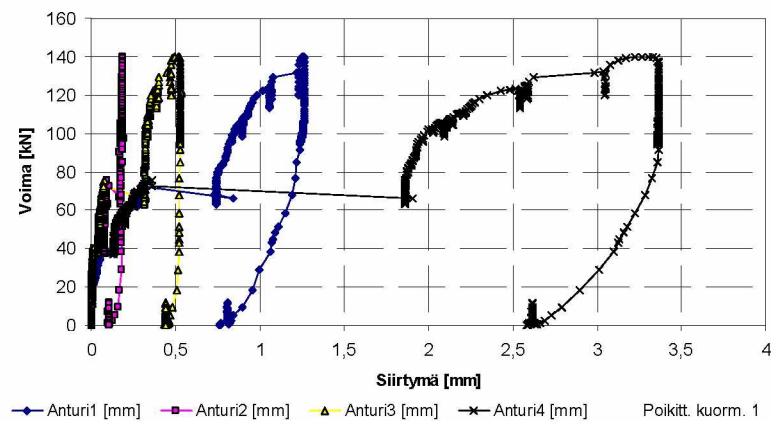
Ratapölkkyt antureiden 1 ja 2 kohdissa siirtyivät suurimmillaan 22 ja 17 mm. Antureiden 1 ja 3 sekä 2 ja 5 kohdat liikkuvat eri nopeudella. Ratapölkkyt kiertyivät tällöin selvästi siirtyessään. Vasemmanpuoleiset pölkkyjen päät (anturit 1 ja 2) liikkuvat ajan-kohdassa 5 minuuttia enemmän kuin oikeanpuoleiset (anturit 3 ja 5).

3.1.3 Poikittaissuuntaisten kuormitusten mittaustulokset

3.1.3.1 Poikittainen kuormitus 1

Ensimmäisessä poikittaisessa kuormituksessa, POK 1:ssä, maksimisiirtymä oli 3,4 mm (anturi 4) ja kokonaissiirtymätaso oli melko pieni. Kaivurin kiskopyörät sijaitsivat lähellä katkaistun raiteen päitä. Siksi raiteen päät (anturit 1 ja 4) liikkuvat selvästi enemmän kuin raiteen keskiosa.

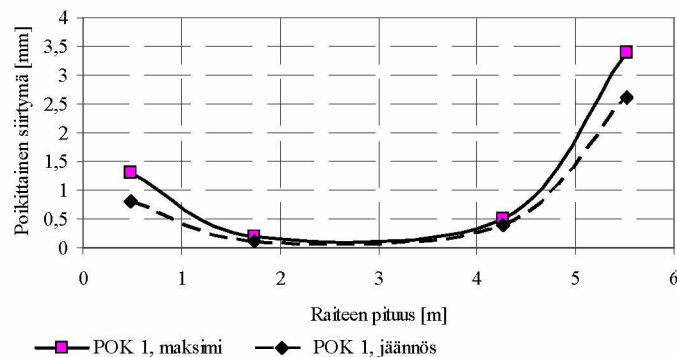
Vaakakuormituksen aikana pystykuormituksena ollut kaivuri siirtyi sivusuunnassa vaakakuormituksen suuntaan, jonka seurauksena myös raide siirtyi hyppäyksellisesti kohdasta 0,3 mm kohtaan 1,9 mm (anturi 4 / kuva 3.14). Kaivurin kiskopyörien laippa painautui äkillisen siirtymän aikana kuormitus suunnassa kiskoa vasten.



Kuva 3.14 Siirtymä-voima-kuvaajat.

Poikittainen voima kehittyi melko tasaisesti ensimmäisen koekuormituksen aikana. Siirtymähyppäyksenkin aikana voima pieneni vain vähän. Maksimivoima oli 140 kN. POK 1:ssä mitattu maksimivoima saattoi olla todellista suurempi. Koe keskeytettiin, koska puomin pää painautui kaivetun ojan ulkoluiskaan ja osa voimasta saattoi suuntautua raiteen sijasta maakerrokseen.

Tampereen puoleiset mittauskohdat, anturit 3 ja 4, näyttivät suurempia siirtymiä kuin Turun puoleiset, vaikka kuormitusjärjestely pyrittiin saamaan keskeiseksi kaivuriin ja raiteeseen nähden (kuva 3.15).



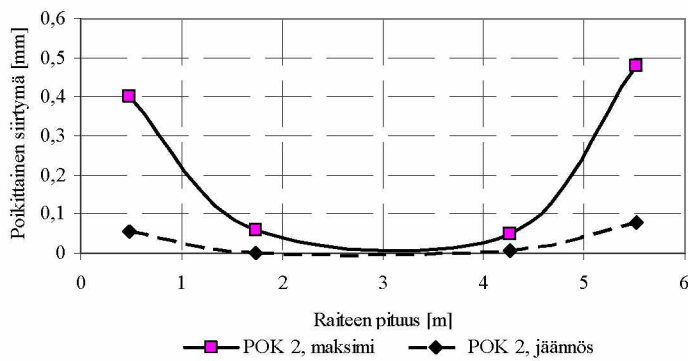
Kuva 3.15 Raiteen kaareutuminen.

3.1.3.2 Poikittainen kuormitus 2

Myös POK 2:ssa reunimmaisten anturien 1 ja 4 kohdissa siirtymät olivat selvästi suuremmat kuin keskimmaisissa antureissa.

Kuormituksen alussa raide oli selvästi jäykempi kuin lähellä maksimivaakavoimaa.

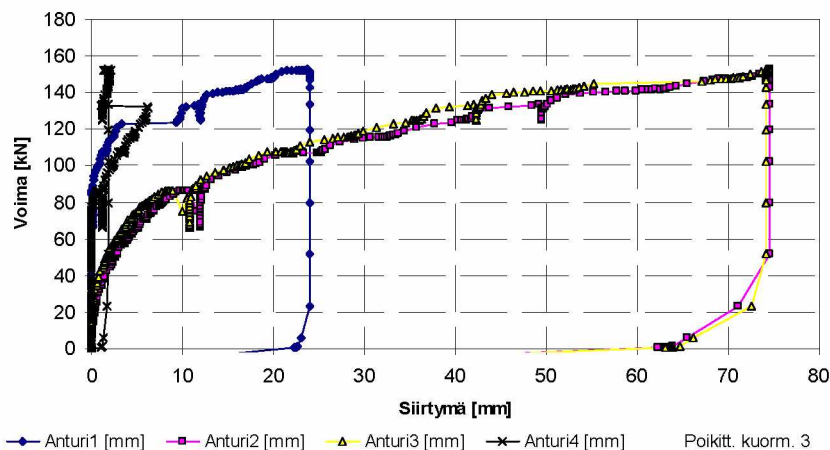
POK 2:ssa raide käyttäytyi kuvan 3.16 mukaisesti miltei symmetrisesti siirtymätason ollessa erittäin pieni.



Kuva 3.16 Raiteen kaareutuminen. Lähtökohtana edellisen kuormituksen jälkeinen raiteen sijainti.

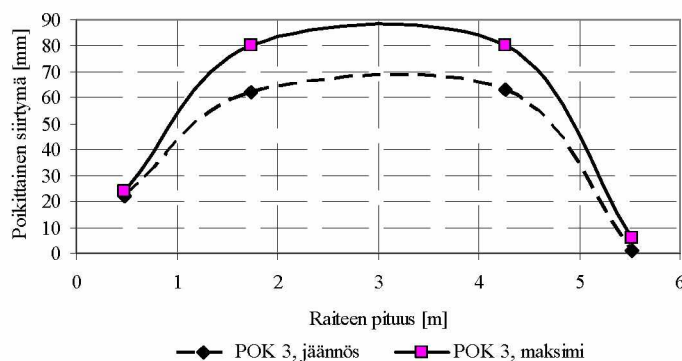
3.1.3.3 Poikittainen kuormitus 3

Tässä kuormitustapauksessa kuormitettiin ketjujen avulla suoraan raidetta ja kisko-pyöräkaivuri lepäsi raiteen päällä pelkästään painona. Keskeisen poikittaissuuntaisen kuormituksen vuoksi reunimmaisten anturien 1 ja 4 kohdissa siirtymät olivat selvästi pienemmät kuin keskimmaisissa antureissa (kuva 3.17). Tavoitetut siirtymätasot ovat moninkertaiset kahteen ensimmäiseen kuormitustapaukseen verrattuna.



Kuva 3.17 Siirtymä-voima-kuvaajat. Anturi 2 ja anturi 3: siirtymät olivat mittareiden tavoittamia maksimiarvoja ja reunimmaisista antureista sekä aiemmasta käyttäytymisestä päätellen ne olisivat olleet noin 6 mm suuremmat, jos siirtymämittauskapasiteetti olisi ollut suurempi.

POK 3:ssa raide käyttäytyi kuvan 3.18 mukaan miltei symmetrisesti, vaikka päätyjen siirtymät poikkesivatkin toisistaan.

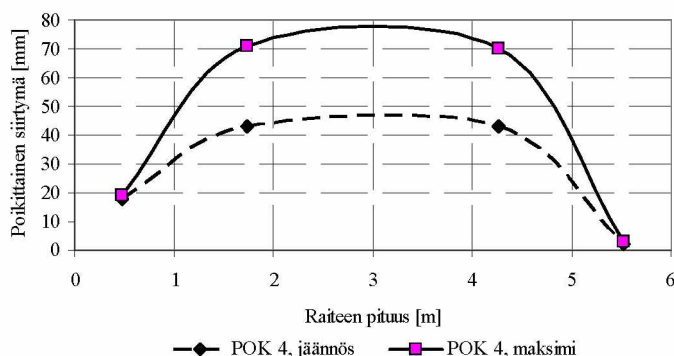


Kuva 3.18 Raiteen kaareutuminen. Lähtökohtana edellisen kuormituksen jälkeinen raiteen sijainti.

Välitarkasteluvaiheessa voimaa ei lisätty vaan se väheni arvosta 87 kN arvoon 68 kN neljän sekunnin aikana. Tämän jälkeen kuormitusta taas lisättiin kunnes raide selvästi lähti liikkumaan kuormituksen suuntaan. Tavoitettu voiman maksimi oli 153 kN.

3.1.3.4 Poikittainen kuormitus 4

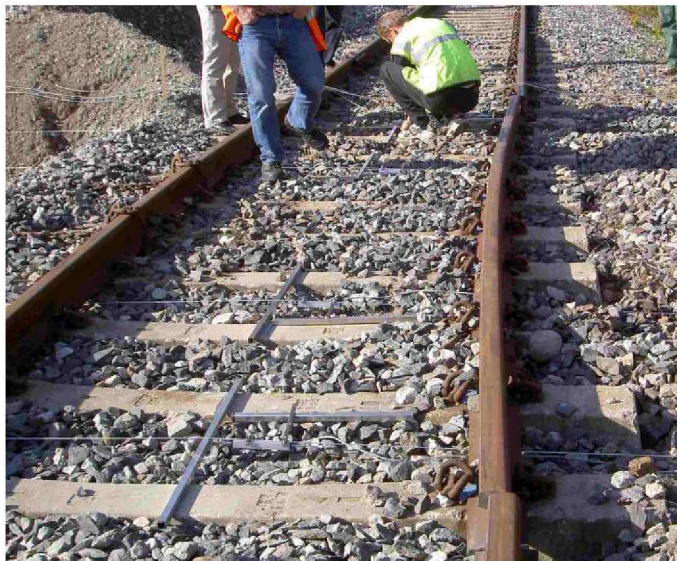
POK 4:ssa raide käyttäytyi miltei symmetrisesti (kuva 3.19), vaikka päätyjen siirtymät poikkesivatkin toisistaan. Keskiosan eli ketjujen kiinnityskohdan siirtymät ovat todennäköisesti olleet esitettyä suuremmat.



Kuva 3.19 Raiteen kaareutuminen. Lähtökohtana edellisen kuormituksen jälkeinen raiteen sijainti. Ensimmäisen kuormituskerran mittaustulokset.

Tavoitettu voiman maksimi molemmilla kuormituskerroilla oli 162 kN. Välillä hetkellisesti voima poistettiin kokonaan.

Raiteen muoto on selvästi kaareva POK 4:n jälkeen. Kuvan 3.20 vasemmasta reunasta voi myös havaita, että ratapölkkyjen edellä työntämä raideseppeli kasaantui ja nousi täten myös ylöspäin. Vastakkaisella puolella ratapölkkyjen päiden takana on tyhjää suurten siirtymien vuoksi.



Kuva 3.20 Raiteen muoto POK 4:n jälkeen.

3.1.3.5 Poikittainen kuormitus 5

Tässäkin kuormitustapauksessa kuormitettiin ketjujen avulla suoraan raidetta, mutta tällä kertaa ilman kiskopyöräkaivurin painoa. Tavoitettu voiman maksimi oli 74 kN. Kuormituksen poiston jälkeenkään raide ei palautunut mittauskohdissa mittareiden mittausalueelle eli kaikki jäännössiirtymätkin olivat yli 76 mm verrattuna tämän kuormitustapauksen aloitushetkeen.

3.1.4 Laskennallinen vertailu ja päätelmät

3.1.4.1 Laskennallinen vertailu, pituussuuntainen kuormitus

Raiteen pituussuuntainen vastus k raiteen pituusmetriä kohden pituussuuntaisen siirtymän funktiona on esitetty lähteessä (UIC 774-3 2001). Vastuksen k arvot plastisella alueella eli kun siirtymä $u_0 \geq 2$ mm:

- $k = 12$ kN/m ratapölkyn vastukselle tukikerroksessa kuormittamattomassa raiteessa tavanomaisella kunnossapidolla,
- $k = 20$ kN/m ratapölkyn vastukselle tukikerroksessa kuormittamattomassa korkean kunnossapidon raiteessa,
- $k = 60$ kN/m ratapölkyn vastukselle kuormitetulla raiteella tai jäätyneessä tukikerroksessa.

Arviot pituussuuntaiselle vastukselle pystykuormittamattomalla raiteella:

- a) Tavanomainen kunnossapito => raidetta kohden $F_{\max} = 12 \text{ kN/m} \cdot 6,5 \text{ m} = 78 \text{ kN}$.

Alkutilan jäykkyys on $12 \text{ kN/m} / 0,002 \text{ m} = 6000 \text{ kN/m/m}$ (kulmakerroin siirtymään 2 mm asti eli kimmoiseksi arvioitu voima-siirtymä -kuvaajan alkuosuus metriä kohden laskettuna).

- b) Korkea kunnossapitotaso => raidetta kohden $F_{\max} = 20 \text{ kN/m} \cdot 6,5 \text{ m} = 130 \text{ kN}$.

Alkutilan jäykkyys on $20 \text{ kN/m} / 0,002 \text{ m} = 10000 \text{ kN/m/m}$ (kulmakerroin siirtymään 2 mm asti eli kimmoiseksi arvioitu voima-siirtymä -kuvaajan alkuosuus metriä kohden laskettuna).

Arviot pituussuuntaiselle vastukselle pystykuormitetulla raiteella

I. 6,5 m pitkä raide, jonka päällä on 4 m pitkä kaivuri

$$F_{\max} = 60 \text{ kN/m} \cdot 4 \text{ m} + 12 \text{ kN/m} \cdot 2,5 \text{ m} = 270 \text{ kN}.$$

Kulmakerroin siirtymään 2 mm asti eli kimmoiseksi arvioitu voima-siirtymä -kuvaajan alkuosuus pituusmetriä kohden laskettuna: $270 \text{ kN} / 6,5 \text{ m} / 0,002 \text{ m} = 20800 \text{ kN/m/m}$ edellä arvioiduilla mitoilla laskettuna.

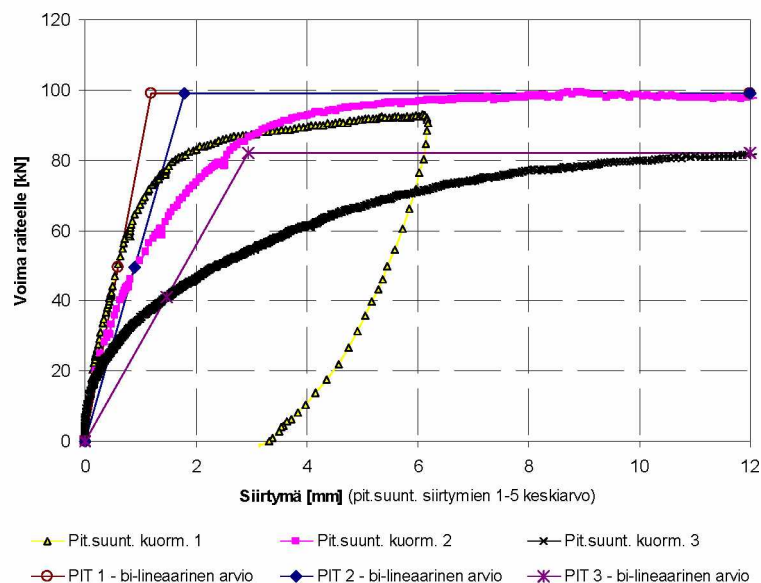
II. 6,5 m pitkä raide, jonka päällä on pystykuorma koko matkalla

$$F_{\max} = 60 \text{ kN/m} \cdot 6,5 \text{ m} = 390 \text{ kN}.$$

Kulmakerroin siirtymään 2 mm asti eli kimmoiseksi arvioitu voima-siirtymä -kuvaajan alkuosuus pituusmetriä kohden laskettuna: $60 \text{ kN/m} / 0,002 \text{ m} = 30000 \text{ kN/m/m}$, kun koko matkalla on pystykuormitus päällä.

3.1.4.2 Raiteen pituussuuntainen vastus, pystykuormittamaton raide

Pituussuuntainen voima raiteelle siirtymän funktiona (pituussuuntaisten siirtymien 1-5 keskiarvo) on esitetty kuvan 3.21 kuvaajassa. Kolmannen koekuormituksen aikana raide oli selvästi menettänyt jäykkyyttään verrattuna kahteen ensimmäiseen kuormitukseen.



Kuva 3.21 Kuormitukset PIT 1 – PIT 3. Pituussuuntainen voima raiteelle - siirtymien keskiarvo -kuvaajat.

Kimmoiseksi arvioitu osuus kokeen alussa raiteen pituusmetriä kohden eli ns. alku-tilan jäykkyys (taulukko 3.3) oli suuruusluokaltaan samansuuruinen kuin oli arvioitu UIC 774-3:n pohjalta.

Taulukko 3.3 Kimmoiseksi arvioitu osuus kokeen alussa. Raidepituus 6,5 m.

	Maksimi-voima raiteessa [kN]	Plastisen siirtymän alku (arvio) [mm]	Kuvaajan kimmoisen osuus [kN/m]	Kuvaajan kimmoisen osuus raiteen pituusmetriä kohden [kN/m/m]
Pit.suunt. kuorm. 1	-	1,2	83474	12842
Pit.suunt. kuorm. 2	99	1,8	55246	8499
Pit.suunt. kuorm. 3	82	2,9	27891	4291

Suurin mitattu voima raiteen pituusmetriä kohden pystykuormittamattomana oli 13... 15 kN/m. Myös suurin mitattu voima raiteessa oli suuruusluokaltaan yhtä suuri kuin oli etukäteen arvioitu (kohta 3.1.4.1) UIC 774-3:n pohjalta.

Queiroz'n (Rantala et al 2013) testissä saatiin betoniratapölkkyä kohden vastukseksi $69\text{ kN}/7\text{ kpl} = 9,86\text{ kN}/\text{betoniratapölkky}$. Mellilän kuormituskokeiden perusteella pystykuormittamattomalle raiteelle saatiin pituussuuntaiselle raidevastukselle arvo $15,2\text{ kN}/\text{m}$ (PIT2) eli noin $9,9\text{ kN}/\text{betoniratapölkky}$ eli täsmälleen sama vastus.

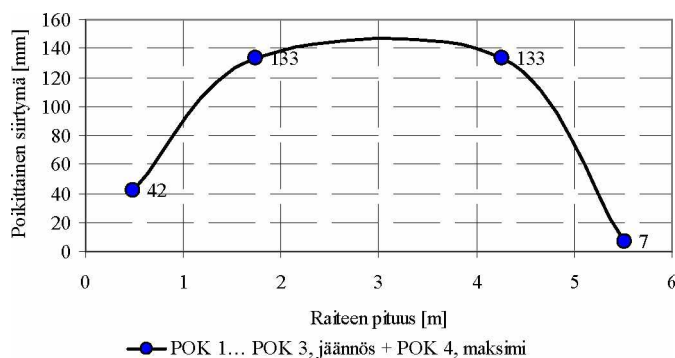
3.1.4.3 Raiteen pituussuuntainen vastus, pystykuormitettu raide

Kimmoiseksi arvioitu osuus kokeen alussa raiteen pituusmetriä kohden oli suuruusluokaltaan samansuuruinen kuin oli arvioitu UIC 774-3:n pohjalta.

Suurin mitattu voima raiteen pituusmetriä kohden pystykuormitettuna oli 26, 15 ja 31 kN/m. Nämä jäivät noin 50 % pienemmiksi kuin oli etukäteen arvioitu UIC 774-3:n pohjalta. Syynä oli kiskojen luistaminen kiskonkiinnitysten suhteen ennen merkittäviä muodonmuutoksia raidesepelissä.

3.1.4.4 Raiteen poikittaissuuntainen vastus

Kiskopyöräkaivurilla kuormitetun raiteen poikittainen kokonaisliike saadaan laske-
malla yhteen kuormituskertojen POK 1... POK 3 jäännössiirtymät sekä POK 4:n maksimisiirtymät ajassa 52 sekuntia. Tulokset on esitetty kuvan 3.22 kuvaajassa. Kiskon Tampereen puoleinen pää liikkui selvästi vähemmän kuin Turun puoleinen pää eikä ollut saavuttanut vielä plastisen liiketilan vaihetta. Keskikohta liikkui symmetrisesti.



Kuva 3.22 Kiskopyöräkaivurilla kuormitetun raiteen poikittainen kokonaisliike.

Kuormituskohtien sijainnin lisäksi raiteen päiden ja keskikohdan siirtymäeroihin vaikutti pystykuormaa välittävien kiskopyörien sijainti lähellä kuormitettavan raidesuuden päätyjä niiden keskinäisen etäisyyden ollessa $k \geq 4,9$ m. Päätt olivat jäykemmät kuin testatun raiteen keskialue.

Tavoitettu poikittaisen voiman maksimi oli 162 kN neljännessä kuormitustapauksessa. Tavoitettu poikittaisen voiman maksimi pystykuormittamattomana oli 74 kN.

Raiteen voimakkaasta kaareutumisesta johtuen koko raiteelle ei voi pelkästään koellisen tutkimuksen pohjalta antaa yhtä poikittaissuuntaista alkukimmokerrointa tai maksimikuormaa raiteen pituusmetriä kohden.

3.2 Betoniratapölkkyjen rasitukset erilaisilla tukikerroksilla

3.2.1 Koejärjestelyt ja testatut ratapölkkyt

Betoniratapölkkyistä saadut käyttökokemukset ovat karkearakeisesta raidesepelistä koostuvilla tukikerroksilla varsin hyviä. On selvää, että ratapölkyn kohtaamaan rasitukseen vaikuttaa merkittävästi ratapölkyn alapuoliseen ratapenkereeseen junakuormituksesta aiheutuvat pysyvät ja palautuvat muodonmuutokset. Yksittäisissä laajalaisemmissa kohteissa, joissa betoniratapölkkyjen on havaittu vaurioituneen, syyksi on arvioitu ratapenkereen, lähinnä raiteen tukikerroksen, heikentynyt toimivuus.

Suomessa olevilla vähäliikenteisillä rataosilla nykyisin käytössä on vielä suurelta osin puuratapölkkyt. Vastaavasti tukikerros koostuu yleensä raidesorasta. Kysymykseksi onkin tulevien perusparannusten yhteydessä muodostunut se, säilyykö betoniratapölkky ehjänä niillä toistokuormituksen aiheuttamilla muodonmuutoksilla, jotka syntyvät raidesorasta koostuvan tukikerroksen sisältävässä ratapenkereessä.

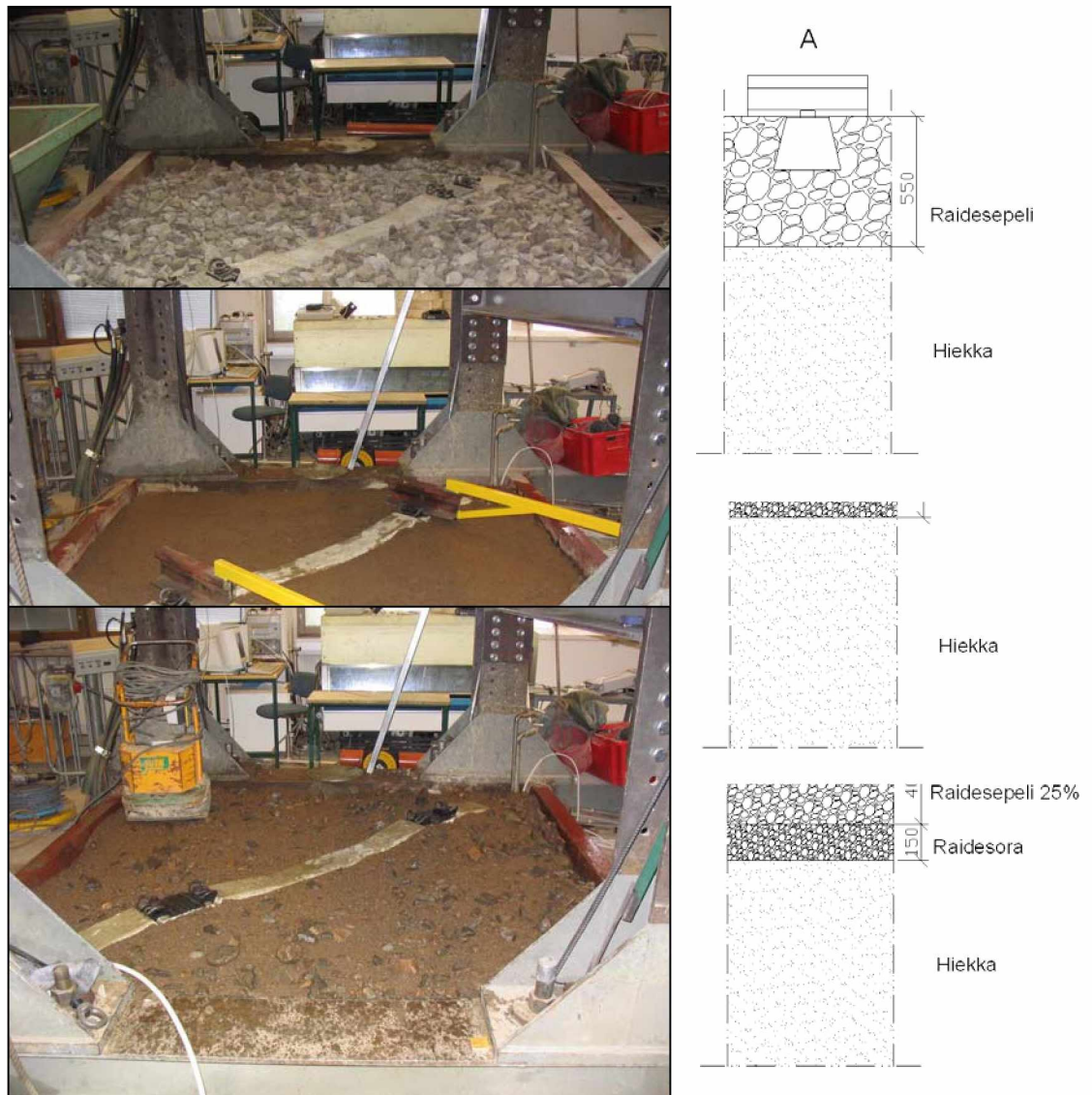
Ongelmaa lähestyttiin laboratoriossa todellisilla tukikerrosmateriaaleilla tehdyillä ratapölkkyjen pitkäkestoisilla toistokuormitustestauksilla. Yksityiskohtaisemmin tutkimusosio on raportoitu lähteessä (Nurmikolu 2007).

Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaukseen kehitetty kuormitusjärjestely (kuva 3.23) rakennettiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallin koekuoppaan, jonka mitat ovat noin 2,5m x 2,5m x 5m (pituus x leveys x syvyys).



Kuva 3.23 Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaukseen kehitetty koejärjestely.

Testausten tavoitteena oli arvioida tukikerroksen laadun ja ratapölkkymallin vaikutusta ratapölkkyyn kehittyviin venymätasoihin. Kokeissa tarkasteltiin kolmea tukikerrostopyyppiä (raidesepeli, osasepelöinti, raidesora; kuva 3.24) ja neljää eri ratapölkkytyyppiä (kuva 3.25), joista kolme oli erityisesti soratukikerroksen haasteisiin kaavailtuja prototyypppejä. Kokeissa mitattiin ratapölkyn venymiä ja siirtymiä sekä venymiä tukikerroksen alapuolisessa maamateriaalissa. Tukikerroksen alapuolinen rakenne koostui tiivistetystä hiekkatäytöstä.



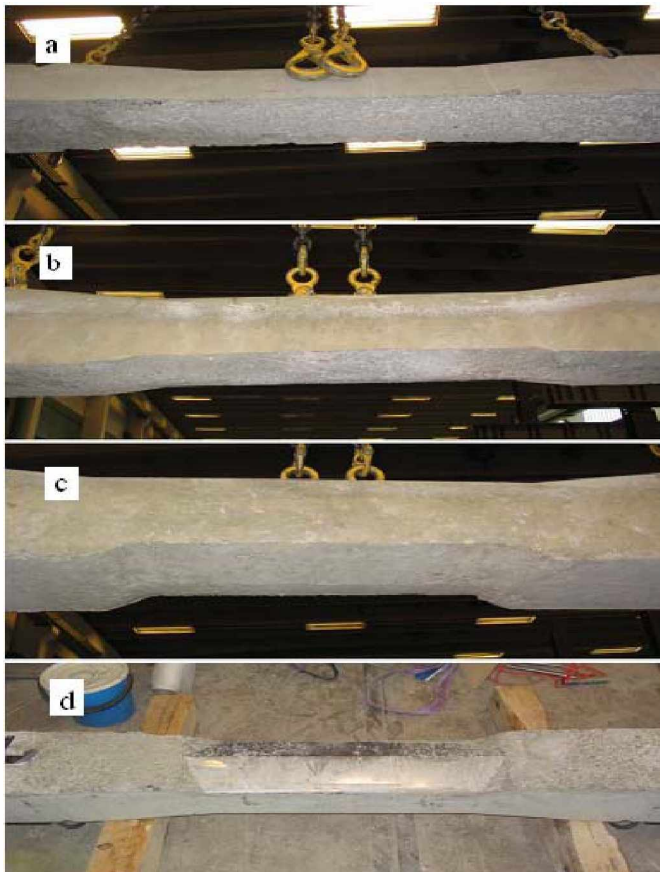
Kuva 3.24 Toistokuormituskokeissa käytetyt tukikerrostyypit: A) raidesepeli, B) raidesora, C) osasepelöinti.

Ratapölkyn asennusalusta pyrittiin kokeessa muotoilemaan silmämääräisesti arvioituna tasaiseksi. Näin toimittiin siitä syystä, että haluttiin välttää ylioptimistiselta lähtötilanteelta ja toisaalta hahmotella tuentatilannetta, johon ratapölkky on jo jonkin aikaa radassa ollessaan päätenyt. Tuloksista käy kuitenkin ilmi, että ratapölkyn asennusalustojen pinnan muodot eivät olleet eri kokeissa täysin vertailukelpoisia. Joissakin kokeissa ratapölkky kantoi lähtötilanteessa hieman päistään ja joissakin hieman raiteen keskeltä. Testattava yksittäinen ratapölkky asennettiin tukikerrokseen ja ratapölkkyyn kiinnitettiin 500mm pituiset kiskot tyypiltään 54E1. Hydraulikoneikon tuottama kuorma jaettiin yksittäisestä sylinteristä kiskoihin ratapölkyn suuntaisen teräspalkin välityksellä.

Usein esitetty yksinkertaistus (esim. Esveld 2001) kuormituksen jakaantumisesta peräkkäisille ratapölkkyille kuuluu, että välittömästi akselin alapuolella oleva ratapölkky välittää enimmillään noin 50 % akselikuormasta. Tällä olettamuksella kokeissa sovellettu 100 kN kuormitustaso vastaa noin 200 kN akselikuormaa. Kuormitus toistettiin 3,6 Hz kuormitustaajuudella koesarjasta riippuen 0,5-1,0 miljoonaa kertaa. Tällöin esimerkiksi 1,0 miljoonan kuormituspulssin koesarja vastasi noin 20 miljoonan tonnin

junakuormitusta, jonka kumuloitumiseen kuluu Suomen vähäliikenteisimmillä rataosilla vuosikymmeniä.

Toistokuormituskokeet tehtiin neljälle eri betoniratapölkkytyypille. Perustapausta edusti linjaratapölkkytyyppi BP99 (kuva 3.25a). Muut testatut ratapölkkytyypit olivat erityisesti soratukikerroksen haasteisiin kaavailtuja prototyyppejä, joille yhteistä oli ratapölkyn pohjan keskiosaan tehty viiste (kuva 3.25b,c,d). Kun ratapölkystä mitatuista venymistä arvioidaan pölkkyyn kohdistuvaa vetoa, tulee huomioida myös esijännityksen aiheuttama puristuma, joka venymän pitää ylittää ennen kuin päädytään vedon puolelle. Laskennallisesti määritettäessä ratapölkyn esipuristumaksi saadaan noin $200\mu\text{m}/\text{m}$. Vastaavalla laskentatavalla kiskon kohdalla vaikuttava esipuristuma on laajemmasta poikkileikkausalasta johtuen noin $140\mu\text{m}/\text{m}$. Näissä arvioissa on oletettu, että ilmoitettu jännevoiman loppuarvo pitää sisällään betonin kutistumisen vaikutuksen. Samaa oletusta käytetään myös jatkossa venymien vaikutuksia arvioitaessa.



Kuva 3.25 Testatut ratapölkkytyypit alapinnastaan kuvattuna.

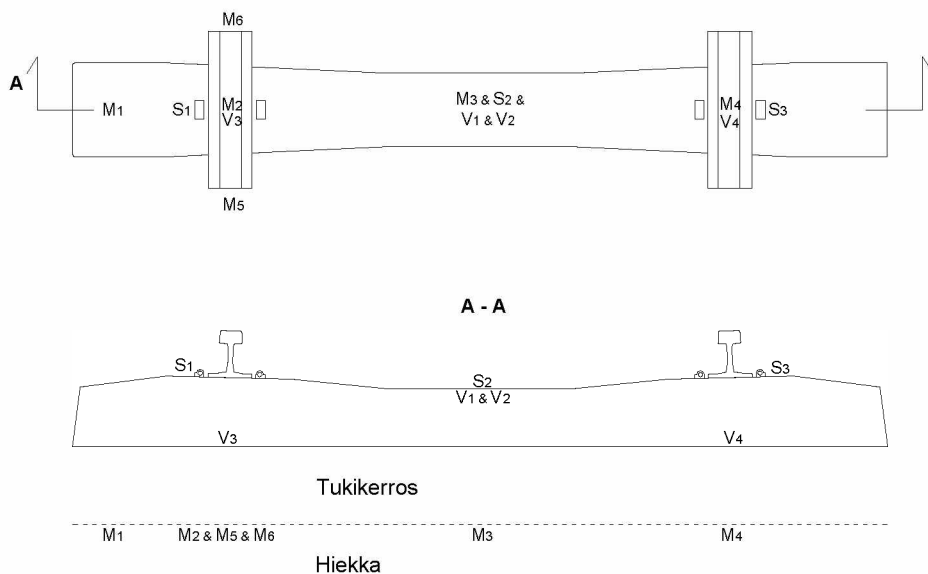
Kuvan 3.25b ratapölkky oli modifioitu ratapölkystä BP99 tekemällä ratapölkyn alapintaan sen keskelle viiste, joka oli 600 mm pitkä ja 20 mm korkea. Toinen prototyyppi kuvassa 3.25c oli viisteen lisäksi varustettu noin 20 mm lisäkorkeudella. Tässä pölkky mallissa viisteen pituus oli noin 500 mm ja korkeus noin 35 mm. Kuvan 3.25d prototyyppi on viisteen aiheuttaman korroosion nopeutumisen estämiseksi lisäksi suojattu ruostumattomalla teräslevyllä viisteen matkalta. Kyseisessä pölkkytyypissä viiste oli tarkastelluista malleista voimakkain, sillä viistetyn osan korkeus oli noin 40 mm ja pituus noin 700 mm.

Kullekin neljälle tarkastelluista pölkkytyypeistä koe tehtiin kolmella eri tukikerroksella taulukon 3.4 mukaisesti. Kussakin kokeessa käytettiin uutta, aiemmin kuormittamatonta ratapölkkyä pois lukien koe 9, jonka ratapölkky oli aiemmin kuormitettu staattisessa testauksessa halkeaman syntyyn saakka.

Taulukko 3.4 Koeohjelma.

Koe nro	Ratapölkkytyyppi	Tukikerros	Kokeen kesto (pulsseja)
1	Linjapölkky	Raidesora	545 000
2	Korotettu, viistetty pölkky	Raidesora	735 000
3	Viistetty pölkky	Raidesora	750 000
4	Linjapölkky	Raidesepeli	745 000
5	Korotettu, viistetty pölkky	Raidesepeli	565 000
6	Viistetty pölkky	Raidesepeli	995 000
7	Linjapölkky	Osasepelöinti	495 000
8	Korotettu, viistetty pölkky	Osasepelöinti	830 000
9	Viistetty pölkky, <i>aiemmin halkeastu</i>	Osasepelöinti	985 000
10	Viistetty, terässuojattu pölkky	Raidesora	935 000
11	Viistetty, terässuojattu pölkky	Osasepelöinti	845 000
12	Viistetty, terässuojattu pölkky	Raidesepeli	860 000

Koesarjoissa mitattiin ratapölkyn venymiä ja pystysiirtymiä sekä venymiä tukikerroksen alapuolisessa hiekassa. Mittauksia tehtiin jatkuvasti 1000 Hz taajuudella ja mittauksista tallennettiin yhden sekunnin jakso tunnin, eli noin 10 000 kuormitus syklin välein. Täten pystyttiin havainnoimaan sekä kuormituspulssin aikana tapahtuvia palautuvia muodonmuutoksia että pysyviä muodonmuutoksia ja niiden kehittymistä toistokuormituksen edetessä. Mittauspisteiden sijoittelu on esitetty kuvassa 3.26, ja mittalaitteita on havainnollistettu kuvassa 3.27.



Kuva 3.26 Ratapölkyn venymäantureiden (V), ratapölkyn pystysiirtymäantureiden (S) ja tukikerroksen alapuoliseen hiekkaan asennettujen venymäantureiden (M) sijoitteluperiaate.

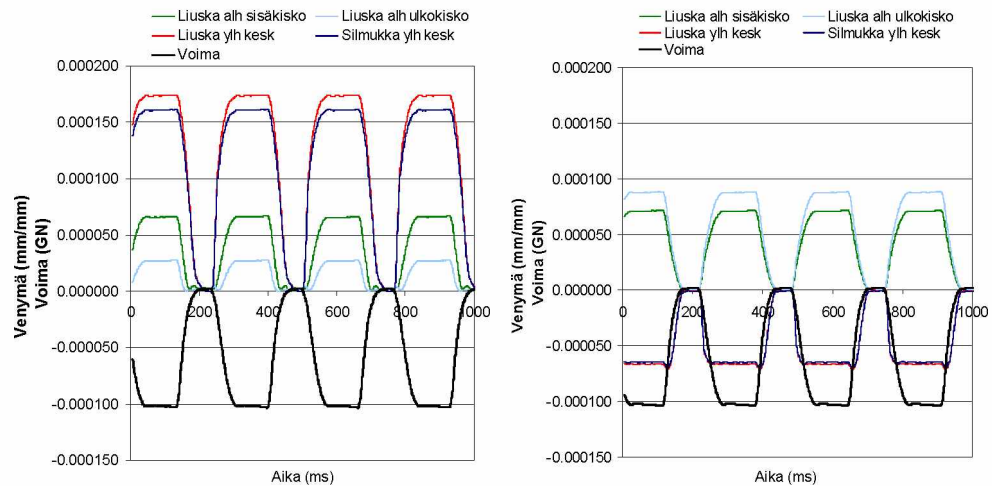


Kuva 3.27 Anturointi ratapölkyn keskellä.

3.2.2 Mittaustulokset

3.2.2.1 Ratapölkyn venymät

Kuvassa 3.28 on esimerkki yhden sekunnin ajalta tyypillisestä ratapölkyn venymämittauksen tuloksesta 300 000 kuormituspulssin kohdalla kokeessa 4, jossa venymiä muodostui kuormituspulssin vaikutuksesta sekä ratapölkyn yläpinnalle raiteen keskelle että ratapölkyn alapinnalle kiskoja alle. Positiivinen venymäsuunta kuvastaa venymää ja negatiivinen suunta puristumaa.



Kuva 3.28 Esimerkki tyypillisistä ratapölkyn venymistä yhden sekunnin ajalta (vasen kuva, koe 4, 300 000 kuormituspulssia) sekä poikkeuksellisesta tilanteesta kokeessa 12 (oikea kuva, 150 000 kuormituspulssia), jossa ratapölkyn yläpinnalle muodostui kuormituspulssin vaikutuksesta puristumaa.

Ratapölkystä mitatut, kuormituspulssien välillä palautuvat venymät on esitetty kootusti taulukossa 3.5. Taulukossa on kuvattu ratapölkyn yläpinnalta mitattujen palautuvien venymien keskiarvo ja ratapölkyn alapinnalta mitattujen palautuvien venymien keskiarvo kokeen alussa ja lopussa. Lisäksi taulukossa nähdään yläpinnan venymien keskiarvo ja alapinnan venymien keskiarvo välillä 100 000–650 000 kuormituspulssia. Tulokset havainnollistuvat kuvissa 3.29 ja 3.30.

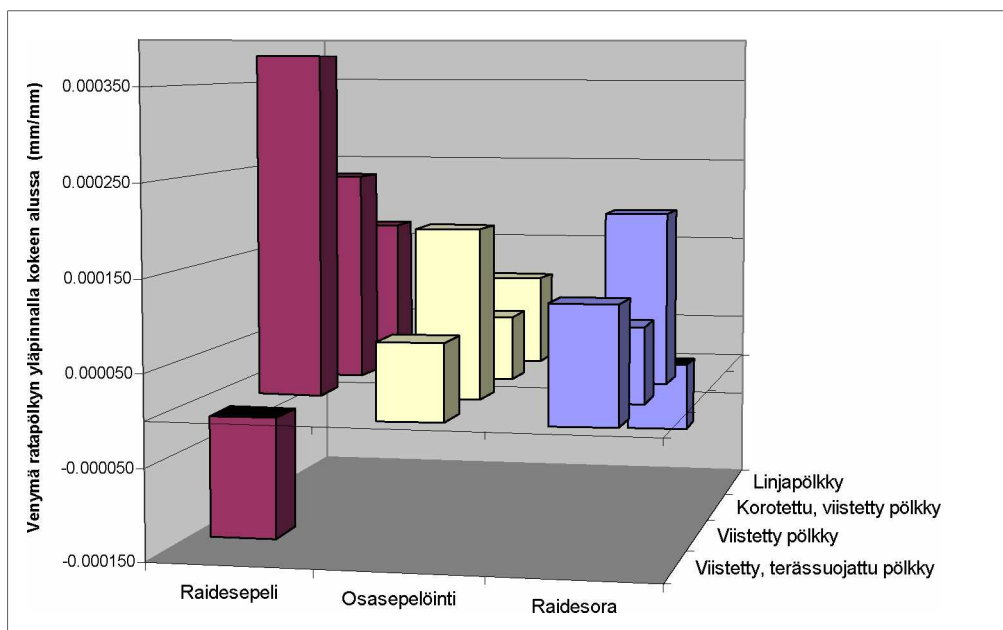
Taulukko 3.5 Yhteenveto ratapölkyn palautuvista venymistä.

Koe	Ratapölkyn palautuvat venymät (mm/mm)					
	Yläpinnalla raiteen keskellä			Alapinnalla keskiarvo kiskojen alla		
	Alussa	Lopussa	Keskitaso välillä 0,1- 0,65·10 ⁶ pulssia	Alussa	Lopussa	Keskitaso välillä 0,1-0,65·10 ⁶ pulssia
1	-0.000080	0.000151	0.000121	0.000091	0.000048	0.000051
2	0.000199	0.000169	0.000174	0.000007	0.000027	0.000025
3	0.000086	0.000180	0.000163	0.000065	0.000057*	0.000055*
4	0.000168	0.000167	0.000169	0.000051	0.000046	0.000046
5	0.000238	0.000171	0.000179	0.000035*	0.000044*	0.000040*
6	0.000382	0.000229	0.000252	0.000025*	0.000056*	0.000047*
7	0.000104	0.000106	0.000102	0.000024	0.000035	0.000034
8	0.000074	0.000099	0.000088	0.000033*	0.000038**	0.000037**
9	0.000190	0.000179*	0.000184*	0.000017*	**	**
10	0.000128	0.000109	0.000109	0.000042	0.000046**	0.000045**
11	0.000084	0.000080	0.000073	0.000039	0.000041**	0.000040**
12	-0.000130	-0.000033	-0.000053	0.000092	0.000073	0.000077

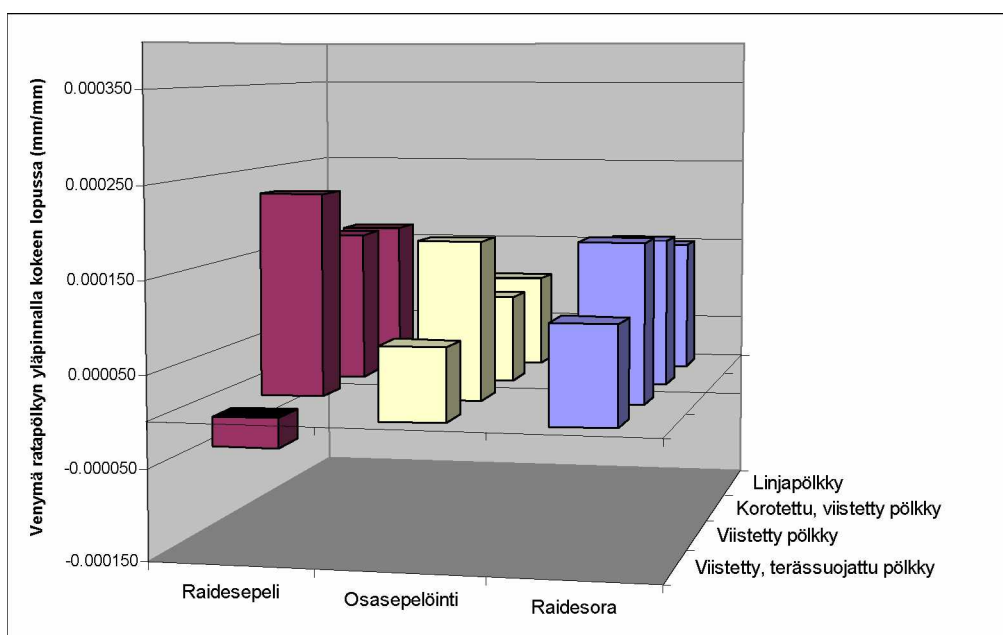
* toinen venymäliuskoista rikkoontunut, joten keskiarvoon suhtauduttava varauksella

** molemmat venymäliuskat rikkoontuneet ennen kokeen loppua, arvo määritelty ennen rikkoontumista, joten kokeen edetessä tapahtuva venymätason mahdollinen muutos ei tule täysin huomioiduksi

Yleishuomiona ratapölkyn palautuvista venymistä voidaan todeta, että lukuun ottamatta kokeita 1 ja 12 kaikissa kokeissa palautuvat venymät olivat selvästi suurempia ratapölkyn yläpinnalla raiteen keskellä kuin ratapölkyn alapinnalla kiskojen alla. Kokeissa 1 ja 12 selittävänä tekijänä on ratapölkyn asennusalan pinnan muoto lähtötilanteessa, joka mahdollisti puristuman muodostumisen ratapölkyn yläpinnalle kuormituspulssien vaikutuksesta.



Kuva 3.29 Ratapölkyn yläpinnan venymät raiteen keskellä (kahden rinnakkaismittauksen keskiarvo) kokeen *alussa*.



Kuva 3.30 Ratapölkyn yläpinnan venymät raiteen keskellä (kahden rinnakkaismittauksen keskiarvo) kokeen *lopussa*.

Toisena yleisenä huomiona venymätasojen voidaan todeta asettuneen eri kokeiden loppuun mennessä suuruusluokaltaan melko samalle tasolle. Peräti kuudessa kokeessa ratapölkyn yläpinnan venymä oli kokeen lopussa tasolla 0.000150 – 0.000180 mm/mm. Tästä tasosta selvästi alemmaksi poikkesi terässuojatulla, viistettyllä ratapölkkyllä tehdyt kokeet sekä osasepelöidyllä tukikerroksella tehdyistä kokeista numerot 7 ja 8. Näissä kokeissa ratapölkyn yläpinnan venymätaso oli puristuman puolella ollut koetta 12 lukuun ottamatta välillä 0.000080 – 0.000110 mm/mm. Yleisestä venymätasosta suurempia kokeen lopussa venymät olivat kokeessa 6 (0.000230 mm/mm), jossa venymä oli kuitenkin pienentynyt 40 % kokeen alkuaan nähden.

Suomessa Koriolla toteutetussa ratarakenteen instrumentointikohteessa mitattiin, että tavarajunan akseleiden aiheuttama venymä raiteen keskellä oli 200 kN:n dynaamisella akselipainolla noin 0.000120 – 0.000140 mm/mm (Kolisoja et al., 2000). On selvää, että tuo tulos ei ole yleistettävissä, koska venymätaso määräytyy ratapenkeeseen muodonmuutosominaisuuksien ja kuormitushistorian perusteella. Nyt tehtyjen kahdentoista kokeen keskiarvona 200 kN junakuormaa vastaavaksi oletetulla kuormalla venymän keskitaso ratapölkyn yläpinnalla raiteen keskellä oli 0.000130 mm/mm, minkä arvon voidaan ajatella periaatteessa kuvastavan venymän vertailuarvoa keskimääräisellä kokeissa käytetyllä alustalla. Tässä valossa nyt mitattujen venymien suuruusluokka vaikuttaa mielekkäältä ja tukee käsitystä siitä, että kuormitusjärjestelyllä pystytään simuloimaan todellista kuormitustilannetta ratapölkyn kannalta ainakin jossain määrin.

3.2.2.2 Ratapölkyn pystysiirtymät

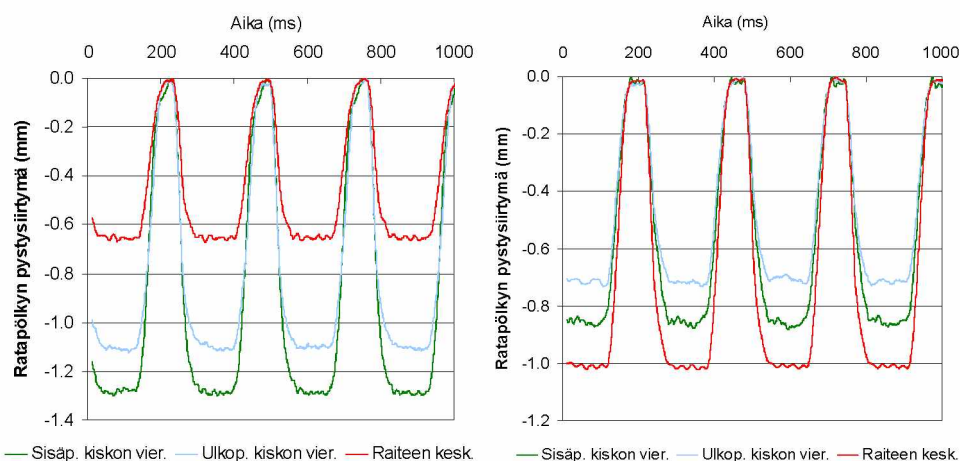
Ratapölkyn yläpinnalle raiteen keskelle venymää syntyy silloin, kun junakuorman aiheuttamat ratapölkyn palautuvat pystysiirtymät kiskojen kohdilla ovat suuremmat kuin raiteen keskellä, eli ratapölkky taipuu. Ratapölkyn palautuva siirtymä oli kiskon vierestä mitattuna kaikkien kokeiden keskiarvona 1,2 mm, joka on suuruusluokaltaan ratarakenteesta tehdyissä mittauksissa vastaavilla akselikuormilla saatujen siirtymien mukainen. Raiteen keskellä palautuva siirtymä oli koetta 12 lukuun ottamatta kaikissa kokeissa varsin lähellä keskiarvoa 0,7 mm, eli erot tässä suhteessa olivat vähäisiä. Kiskojen vierestä tehdyissä mittauksissa eroja oli enemmän ja siirtymät eri kiskojen vieressä olivat usein eri suuria. Keskimääräinen ratapölkyn taipuma raiteen keskellä oli siten 0,5 mm. Siirtymistä lasketut vertailuluvut on esitetty koekohtaisesti taulukossa 3.6.

Kuvassa 3.31 on esitetty yhden sekunnin ajalta esimerkki tyypillisestä siirtymämittauksen tuloksesta, jossa raiteen keskeltä mitattu palautuva siirtymä on selvästi pienempi kuin kiskon vierestä mitatut palautuvat siirtymät. Kyseinen siirtymäero kuvaa ratapölkyn taipumaa, joka aiheuttaa venymää ratapölkyn yläpinnalle raiteen keskelle.

Taulukko 3.6 Ratapölkyn siirtymämittausten tuloksia

Koe	Ratapölkyn pystysiirtymät (mm)								
	Palautuva, keskitaso välillä 100 000 – 650 000 puls- sia			Palautuva + pysyvä, lisäys välillä 1 – 550 000 pulssia			Palautuva + pysyvä, lisäys välillä 150 000 – 550 000 puls- sia		
	Keski- arvo kisko- jen vier.	Raiteen kesk.	Ero	Keski- arvo kisko- jen vier.	Raiteen kesk.	Ero	Keski- arvo kisko- jen vier.	Raiteen kesk.	Ero
1									
2	1.46	0.74	0.72	2.40	2.83	-0.43	1.19	1.42	-0.23
3	1.20	0.71	0.48	3.85	3.55	0.29	1.24	1.26	-0.02
4	1.21	0.67	0.54	2.55	2.60	-0.04	0.87	0.83	0.03
5	1.37	0.70	0.67	3.17	3.60	-0.43	0.78	0.99	-0.21
6	1.49	0.71	0.79	4.28	4.60	-0.32	0.67	0.83	-0.16
7*	1.27	0.86	0.41	4.32	4.62	-0.30	0.97	1.08	-0.11
8	0.95	0.65	0.30						
9	1.33	0.66	0.67	3.20	3.38	-0.18	0.60	0.72	-0.12
10	1.21	0.75	0.45	3.72	4.16	-0.44	0.93	0.99	-0.07
11	0.90	0.70	0.20	3.26	3.45	-0.19	0.68	0.77	-0.09
12	0.78	0.94	-0.15	3.84	3.66	0.18	0.67	0.63	0.04

* kokeen kesto vain $0,495 \cdot 10^6$ pulssia

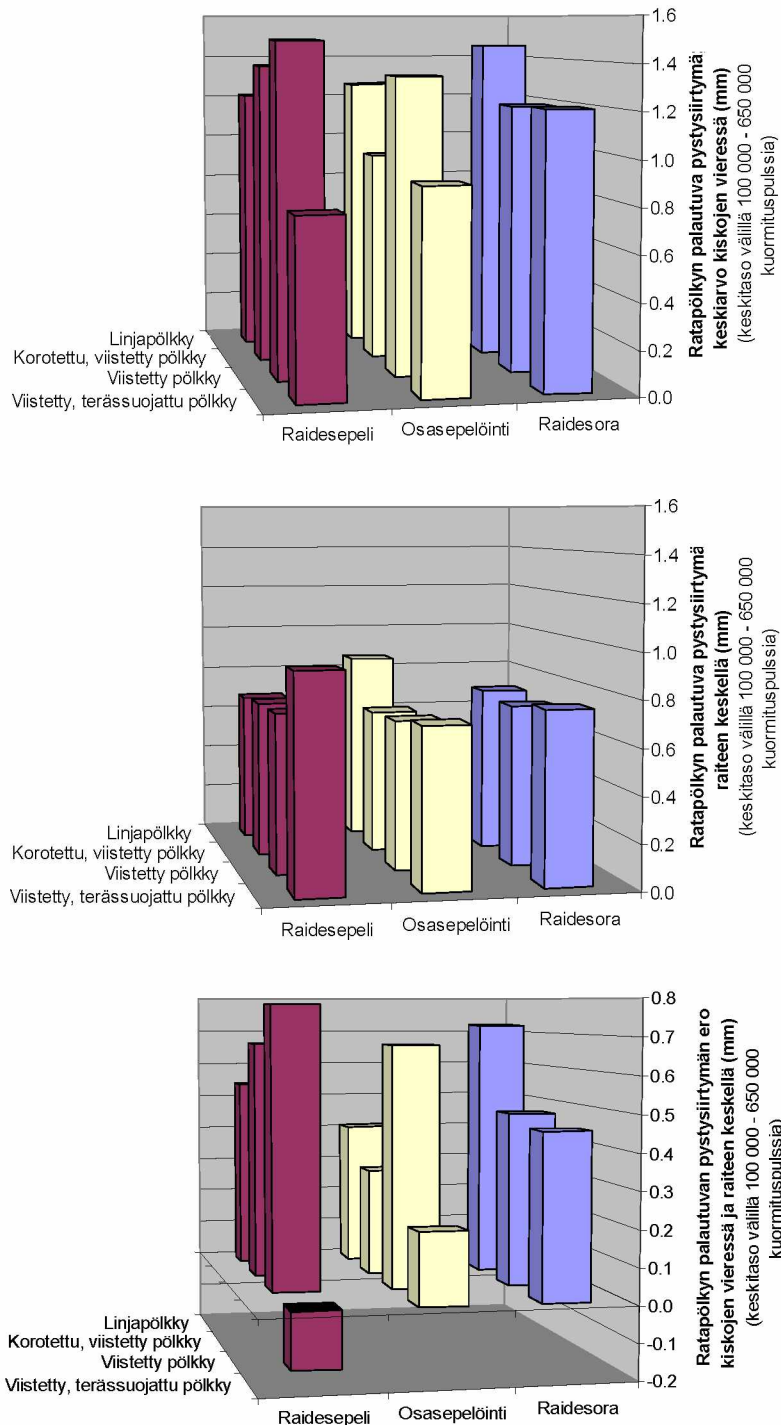


Kuva 3.31 Esimerkki tyypillisistä ratapölkyn pystysiirtymistä (vasen kuva, koe 4, 300000 kuormituspulssia) sekä pystysiirtymistä poikkeuksellisessa kokeessa 12 (oikea kuva, 150000 kuormituspulssia), jossa ratapölkyn yläpinnalle muodostui kuormituspulssin vaikutuksesta puristumaa.

Ratapölkyn pysyvät pystysiirtymät ilmentävät ratapölkyn alustan painumista kuormituspulssien seurauksena. Ilman kuormaa mitatun pystysiirtymän muutos, eli ratapölkyn painuma, ei kuitenkaan kerro ratapölkyn kohtaamasta taivutusrasituksesta juuri mitään. Kuormituksen poistamisen jälkeen ratapölkyn alustan mahdollinen epätasaisuus ei ilmene mitenkään, jolloin ratapölkyn kontakti tukikerrokseen saattaisi olla jopa kadonnut ratapölkyn päissä, mutta silti pölkyn päissä ja keskellä ilman kuormitusta mitattu pysyvä painuma olisi kuitenkin yhtä suuri. Näin ollen alustan mahdolli-

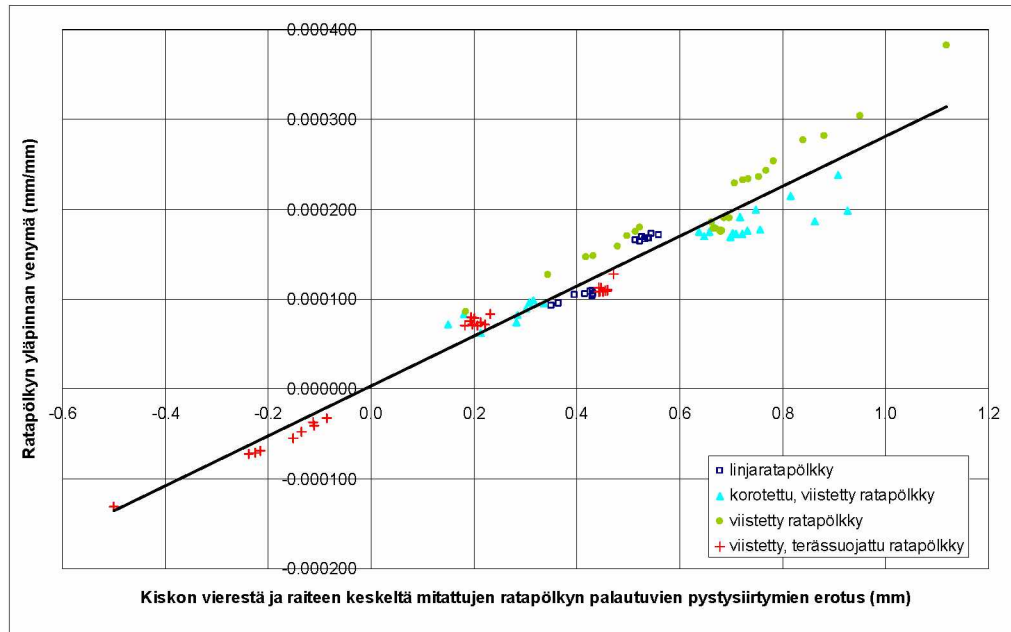
nen epätasainen painuminen ilmenee parhaiten ratapölkyn eri kohdista *kuormituksen alaisena* mitattujen siirtymien eron, eli taipuman, kehittymistä tarkastelemalla.

Ratapölkyn palautuvat pystysiirtymät havainnollistuvat kuvassa 3.32. On huomattava, että palautuvien ratapölkyn siirtymien taso kaikilla tukikerroksilla on samaa suuruusluokkaa.



Kuva 3.32 Ratapölkyn keskimääräiset palautuvat pystysiirtymät kiskoja vieressä (ylh) ja raiteen keskellä (kesk) sekä niiden erotus (alh.).

Ratapölkyn pituussuunnassa eri kohdista mitattujen palautuvien pystysiirtymien erotus määrää kuvan 3.33 perusteella suurelta osin ratapölkyn yläpinnan venymän. Kuvassa esitetty siirtymien erotus kuvaa kiskojen vierestä mitattujen siirtymien keskiarvon ja raiteen keskeltä mitatun siirtymän erotusta.



Kuva 3.33 Ratapölkyn yläpinnasta mitatun venymän riippuvuus kiskojen vierestä ja raiteen keskeltä mitattujen palautuvien pystysiirtymien erosta, eli ratapölkyn taipumasta.

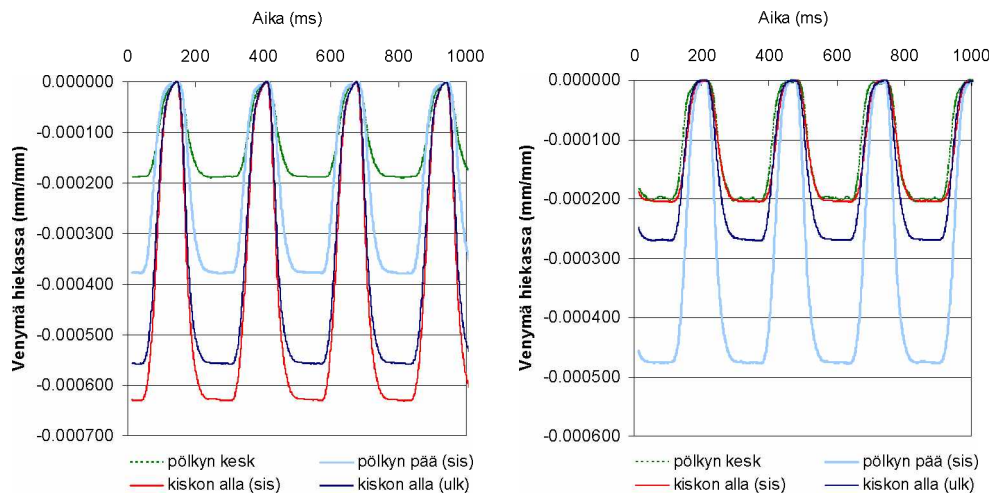
Pölkyn taipuma lisääntyi kokeen edetessä voimakkaimmin kokeissa 12 ja 3, joissa myös venymätason kasvu kokeen aikana oli suurinta. Kokeen edetessä lisääntyvä taipuma ilmentää ratapölkyn alustan sellaista epätasaista painumista, joka on kiskojen alla ja pölkyn päissä suurempaa kuin raiteen keskellä. Tälle päinvastainen havainto, eli kokeen edetessä pienenevä taipuma ja venymä, on nähtävissä etenkin kokeissa 5, 6 ja 2. Näissä kokeissa ratapölkyn alusta on painunut enemmän raiteen keskellä kuin kiskojen läheisyydessä.

Ratapölkyn pystysiirtymiä tarkasteltaessa havaittiin, että ratapölkyn taipuma ei merkittävästi lisääntynyt kokeiden loppuvaiheissa. Tämä viestii siitä, että ratapölkyn taiputusrasitus ei ainakaan dramaattisesti kasvaisi kuormituspulssimäärää vielä jonkin verran lisättäessä. Mahdolliseen väsymiseen kuormitusmäärän lisäämisellä toki on vaikutusta.

3.2.2.3 Venymät tukikerroksen alapuolisen hiekan pinnalla

Tukikerroksen alapuolisen hiekan pinnalta mitatuista venymistä voidaan tehdä ratapölkyn käyttäytymistä oleellisesti havainnollistavia päätelmiä. Kuvassa 3.34 (vasen) nähdään esimerkki melko tyypillisistä kokeissa todetuista hiekan puristumista, jotka ovat suurimmillaan kiskojen alapuolella, jonkin verran pienempiä ratapölkyn päissä ja selvästi pienimpiä raiteen keskellä. Tulos kuvastaa oletettavasti tavanomaista tapautta, jossa kuormitus ratapölkystä tukikerrokseen välittyy selvästi enemmän kiskojen kohdilta ja ratapölkyn päistä kuin raiteen keskeltä.

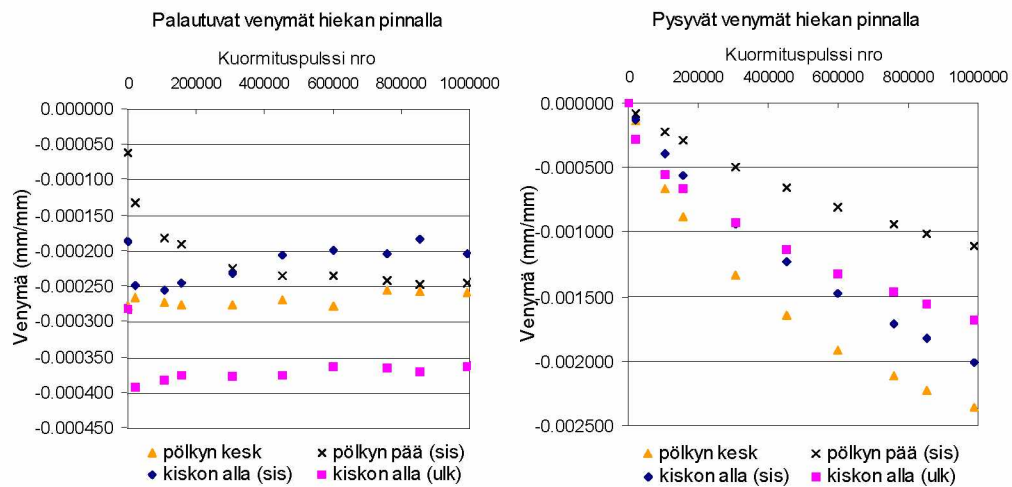
Ääritilanne kuormituksen keskittymisestä ratapölkyn päähän ("ratapölkky kantaa päistään") ilmenee hiekan venyminä kuvassa 3.34 (oikea) esitetyllä tavalla (koe 12, 150000 kuormituspulssia). Hiekan puristuma ratapölkyn päässä on merkittävästi suurempi kuin muissa mittauspisteissä. Kuvan mukaisessa tilanteessa kuormituspulssi aiheutti puristuman raiteen keskelle ratapölkyn yläpinnalla. Toisaalta ratapölkyn alapinnalla kiskojen alla venymät olivat muihin kokeisiin nähden suurempia, mutta kuitenkin selvästi pienempiä kuin useissa muissa kokeissa ratapölkyn yläpinnalla. Näin ollen kyseinen tilanne on ratapölkyn taivutusrasituksen kannalta suhteellisen edullinen, mutta toisaalta tukikerrosta ja muuta ratapenkerettä ajatellen kuormituksen keskittyminen ratapölkyn päähän luo edellytyksiä penkereen pysyville muodonmuutoksille. Penkereen mahdollisten pysyvien muodonmuutosten seurauksena tilanne muuttuu kuvan 3.34 (vasen) havainnollistamaan suuntaan.



Kuva 3.34 Hiekan venymämittauksista havaittu melko tyypillinen tilanne, jossa suurimmat puristumat ovat kiskojen alla (vasen kuva, koe 7, 300 000 kuormituspulssia) ja b) poikkeava tilanne, jossa selvästi suurin puristuma hiekan ratapölkyn päässä (oikea kuva, koe 12, 150 000 kuormituspulssia).

Toisessa ääripäässä ratapölkyn kuormitus välittyy tukikerrokseen merkittävästi myös raiteen keskeltä ("ratapölkky kantaa keskeltä"). Tällainen tilanne on mahdollinen silloin, kun ratapölkyn alusta joustaa voimakkaasti kiskojen läheisyydessä ja ratapölkyn päissä. Tilanne on ratapölkyn taivutusrasituksen kannalta kriittinen ja sen voidaan arvioida ilmenevän hiekan mitatuista venymistä. Suurimmat venymät ratapölkyn yläpinnalla oli kokeen 6 alussa. Tässä kokeessa puristumat hiekan raiteen keskellä suurempia kuin ratapölkyn päässä ja toisen kiskon alla (kuva 3.35 vasen). Kuormitustilanne oli epäsymmetrinen, sillä palautuvien pystysiirtymien perusteella toisen kiskon vieressä siirtymä oli merkittävästi suurempi kuin toisen kiskon vieressä. Ratapölkyn yläpinnan venymän pieneneminen kokeen edetessä johtui ratapölkyn keskiosasta välittyneen kuormituksen aiheuttamasta penkereen tiivistymisestä raiteen keskellä. Tämä ilmenee kuvassa 3.35 (oikea) esitetyistä hiekan pysyvistä puristumista, jotka ovat suurimmat nimenomaan raiteen keskellä. Tiivistymisen seurauksena kuormitus välittyi jatkossa enemmän ratapölkyn päistä, mikä havaitaan myös kuvassa 3.35 (vasen) hiekan palautuvan puristuman lisääntymisenä pölkyn päässä. Havaintoja tukee myös ratapölkyn siirtymämittaukset, joiden mukaan palautuva siirtymä kiskojen vieressä pieneni kokeen edetessä. Kokeen 6 tilanne on seurausta siitä, että tukikerroksen pinta on ollut ratapölkkyä asennettaessa keskeltä koholla. Periaatteeltaan kokeen alku kuitenkin kuvaa hyvin sitä ratapölkyn kannalta kriittistä tilannetta, johon

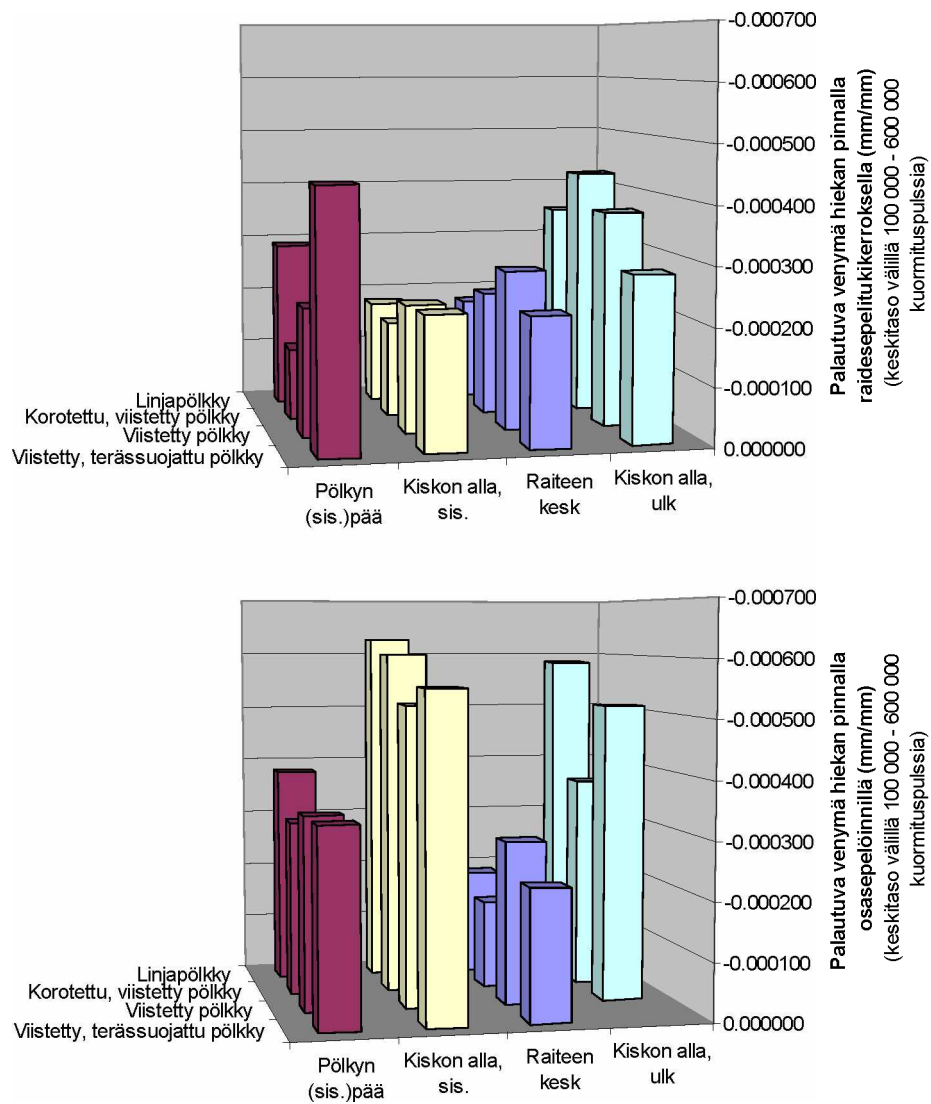
ratapölkyn päihin keskittyvien penkereen muodonmuutosten seurauksena voidaan päätyä.



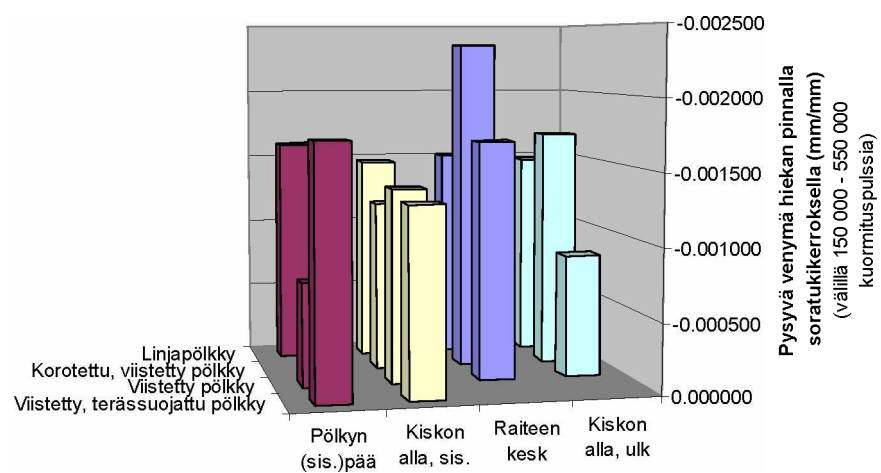
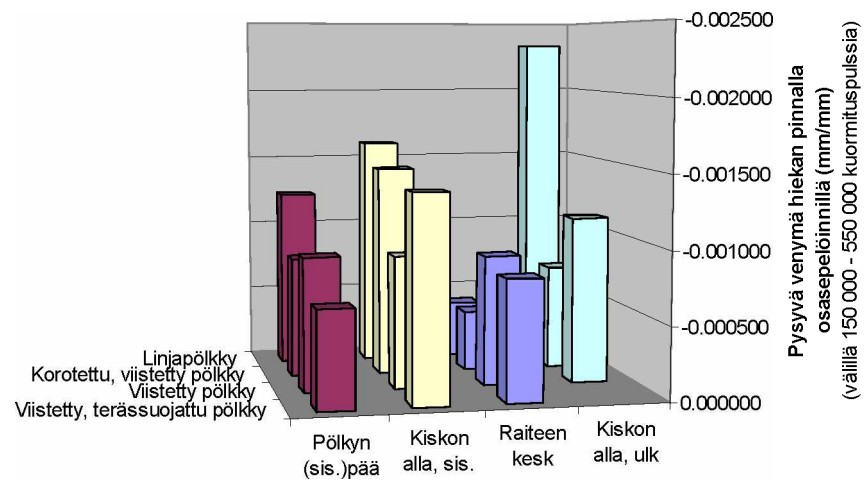
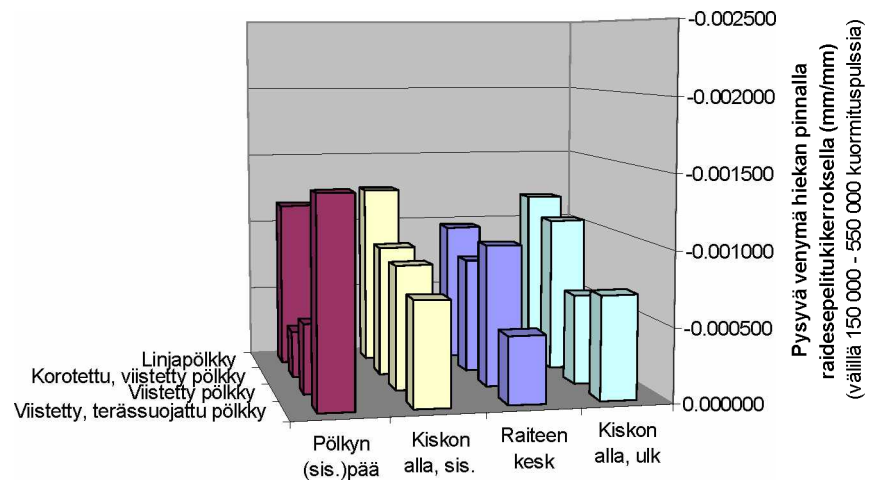
Kuva 3.35 Tukikerroksen alapuolisen hiekan pinnalta mitatut palautuvat (vasen kuva) ja pysyvät (oikea kuva) venymät kokeessa 6, jossa ratapölkyn yläpinnan venymät olivat suuria kokeen alussa.

Kuvassa 3.36 on havainnollistettu keskimääräisiä kokeen aikaisia hiekan palautuvia venymiä kiskojen vieressä ja raiteen keskellä raideseipelitukikerroksella ja osasepelöidyllä tukikerroksella tehdyissä kokeissa. Kuvasta nähdään, että osasepelöinnillä tehdyissä kokeissa kuormitus on välittynyt selvästi enemmän kiskoja lähemmäs ja pölkyn päistä kuin raiteen keskeltä. Raideseipelitukikerrosten kuormitus on vastaavasti ollut suhteellisen samansuuruinen kiskoja kohdalla ja raiteen keskellä, mikä johtui keskeltä kantamisen mahdollistaneesta lähtötilanteesta. Kokeessa 12 (teräs-suojattu, viistetty pölkky) suurin kuormitus havaitaan kohdistuneen pölkyn päihin, mikä vastaa ratapölkyn venymämittausten havaintoja.

Periaatteessa vastaavat havainnot voidaan tehdä myös kuvassa 3.37 esitetyistä pysyvistä venymistä. Lisäksi nähdään, että soratukikerroksella tehdyissä kokeissa hiekan pysyvät venymät olivat kauttaaltaan suurempia kuin sepelöidyissä tai osasepelöidyissä tukikerroksissa. Tämä johtuu siitä, että soratukikerros on ohuempi, jolloin ratapölkystä jännityksillä on heikommat mahdollisuudet jakautua raiteen suuntaan ja keskimääräinen pystyjännitys hiekan pinnalla on väistämättä suurempi.



Kuva 3.36 Tukikerroksen alapuolisen hiekan pinnalta eri kohdista mitattujen keskimääräisten palautuvien venymien vertailu raidesepelitikkerroksella ja osasepelöinnillä tehdyissä kokeissa.

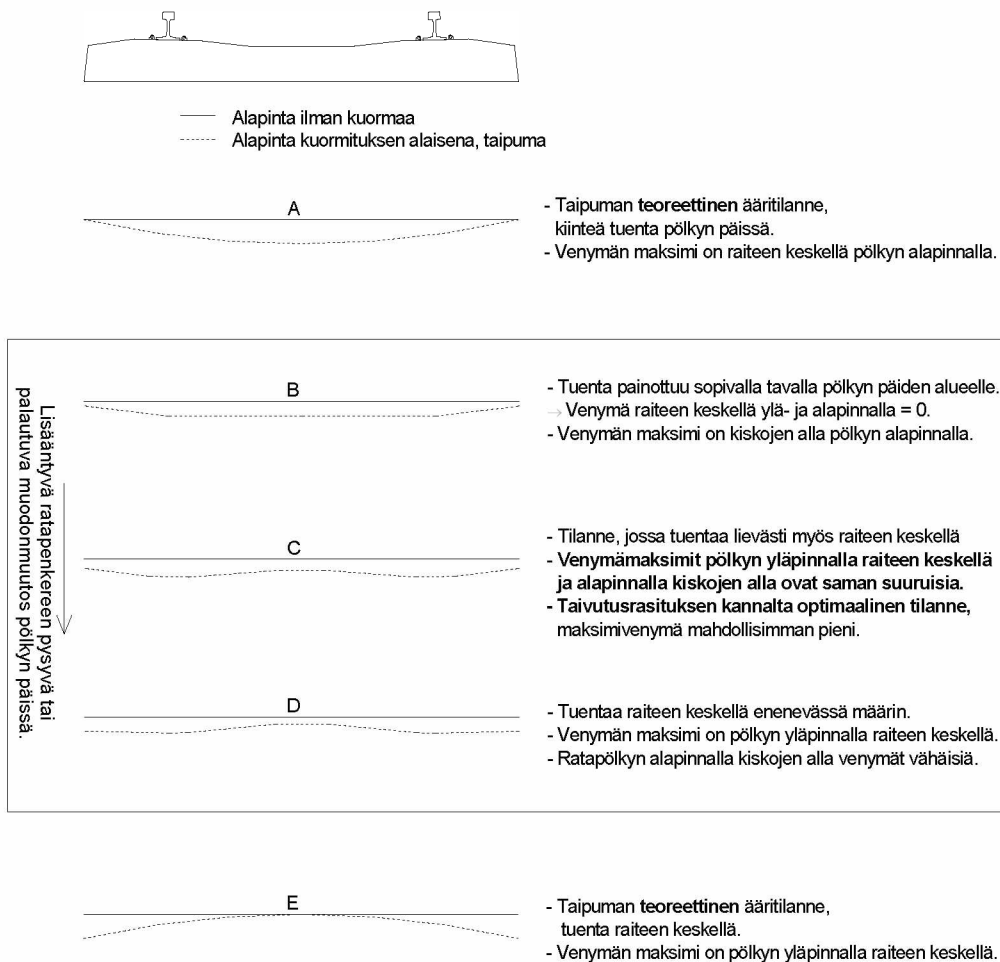


Kuva 3.37 Tukikerroksen alapuolisen hiekan pinnalta eri kohdista mitattujen pysyvien venymien vertailu raidesepelitikkerroksella, osasepelöinnillä ja soratukikerroksella tehdyissä kokeissa.

3.2.3 Tulosten arviointi ja päätelmät

3.2.3.1 Ajatusmalli ratapölkyn ja ratapenkereen yhteistoiminnasta

Ratapölkyn kestävyys kannalta teoreettiseksi ideaalitalanteeksi on nähtävissä se, jossa kuormituksen aiheuttaman jouston suuruus ratapölkyn päissä ja kiskojen läheisyydessä on sellainen, että sen seurauksena ratapölkyn yläpinnalle raiteen keskelle muodostuva venymä on yhtä suuri kuin ratapölkyn alapinnalle kiskojen kohdille aiheutuva venymä (kuva 3.38C). Tässä ei huomioida esijännityksen eroja ratapölkyn eri kohdissa. On huomattava, että tuen jakaantumisen periaatteelliset vaikutussuunnat ovat ratapenkereen epätasaisten muodonmuutosten ja toisaalta ratapölkyn kohtaaman taivutusrasituksen suhteen vastakkaiset. Kun tuki keskittyy ratapölkyn päihin ja kiskojen alle, ratapölkyn taivutusrasitus on optimaalisen vähäinen, mutta kuormituksen keskittyminen luo edellytykset ratapenkereen korostuneille muodonmuutoksille tällä alueella.



Kuva 3.38 Periaatteellinen hahmotelma ratapenkereen tarjoaman tuennan vaikutuksesta ratapölkyn taipumaan. Tuentatapaukset A ja E kuvaavat teoreettisia ääritilanteita.

Kärjistettynä kyse on siitä, kykeneekö tukikerros ja muu ratapenger ilman pysyviä ja suuria palautuvia muodonmuutoksia kantamaan ratapölkyn päiden alueelle keskittyneen kuorman kuvan 3.38B tai 3.38C mukaisessa lähtötilanteessa. Mikäli pystyy, niin kuormitustilanne säilyy toistokuormituksessa suhteellisen vakaana. Jos taas ratapen-

ger on hyvin joustava tai siihen syntyy esimerkiksi raidesepelin hienonemisen myötä pysyviä muodonmuutoksia, ratapölkyn tuenta-alue alkaa kasvavan taipuman myötä laajeta yhä lähemmäksi raiteen keskustaa (kuva 3.38D). Toisaalta tällöin tukikerrokseen kohdistuva maksimikuorma pienenee.

On mahdollista, että jossain kohtaa saavutetaan tilanne, jossa tuenta on tasainen koko ratapölkyn mitalla. Erittäin suuri periaatteellinen kysymys on se, vaurioituuko ratapölkky kyseisessä tasaisen tuennan tilanteessa, sillä tilanne ei periaatteessa voi edetä siitä pahemmaksi, mikäli ratapenkereen jäykkyys ratapölkyn alla on sama raiteen keskellä ja ratapölkyn päissä. Tasaisen kuormituksen aiheuttamat mahdolliset pysyvät muodonmuutokset ovat tällöin yhtä suuria raiteen keskellä ja ratapölkyn päissä, eikä taipumaero lisäännä. Tämän ajatusmallin nojalla tilanne, jossa ratapölkyn pohjapaine raiteen keskellä on suurempi kuin ratapölkyn päissä, on mahdollista kehittyä vain silloin, kun ratapenkereen jäykkyys pölkyn päissä on heikompi kuin raiteen keskellä. Sellaisessa tilanteessa on mahdollista, että samansuuruinen, tai jopa pienempi, kuormitus aiheuttaa ratapölkyn päissä suuremman pysyvän muodonmuutoksen kuin raiteen keskellä. Tällainen jäykkyysero saattaa todellisessa ratarakenteessa olla mahdollista ainakin rajallisesta penkereen leveysulottuvuudesta johtuen. Koejärjestelyissä penkereen rajallisen leveyden vaikutus ei tullut huomioiduksi, koska ratapölkyn alapuolisen aineksen leviäminen sivusuunnassa oli koekuopan seinämien johdosta estetty. Koejärjestelyä on mahdollista jossain määrin muokata asian vaikutuksen arvioimiseksi jatkossa.

Ratapölkyn alustan jäykkyysero voidaan ajatella mahdolliseksi myös silloin, kun tukemiskone ja aiemmin ratapölkyn päihin keskittynyt kuormitus on hienontanut tukikerrosateriaalia miltei ainoastaan ratapölkyn päistä. Hienonemisen keskittyminen ratapölkyn päihin on useissa raidesepelin kenttätutkimuskohteissa todettu tilanne. Kenttäolosuhteissa havaittuja vaurioituneiden ratapölkkyjen kohteita olisi mielekästä tarkastella pölkkyjen venymämittausten ohella myös alla olevan tukikerroksen kunnon osalta.

Penkereen rajallisen leveysulottuvuuden ja raidesepelin epätasaisen hienonemisen ohella kolmas kyseeseen tuleva tekijä, joka voisi aiheuttaa ratapölkkyyn raiteen keskelle suuremman tuennan kuin ratapölkyn päihin on etenkin vähäliikenteisillä rataosilla mahdollinen routiminen. Routanousu voidaan lumen eristävästä vaikutuksesta johtuen arvioida raiteen keskellä suuremmaksi kuin ratapölkyn päissä. Jossain määrin tukikerroksen epätasaiseen jäykkyyteen johtava tekijä saattaisi olla myös raiteen tukeminen. Tukeminen pienentää keskeltä kantavan ratapölkyn taivutusrasitusta, kun ratapölkyn alle sen päihin työnnetään tukikerrosainesta. Haittoina on kuitenkin se, että tukeminen hienontaa raidesepeliä merkittävästi ja toisaalta lyhydyttää tukikerrosta, mistä syystä saavutettava hyöty voi olla melko lyhytaikainen ja lopulta päädytään alkutilannetta epäedullisempaan tilanteeseen. Vaihtoehtoinen stoneblowing-menetelmä on tässä suhteessa pitkäkestoisempi ratkaisu.

Vaihtelevat akselikuormat huomioiden teoreettinen tavoitetilanne ratapölkyn tuennalle olisi sellainen, jossa keskimääräiset akselikuormat aiheuttavat kuvan 3.38C mukaisen ratapölkyn tuennan, josta pienet akselikuormat poikkeavat kuvan 3.38B mukaiseen suuntaan ja maksimiakselikuormat vastaavasti kuvan 3.38D mukaiseen suuntaan. Edullisinta tuennan lähtötilannetta pohdittaessa on kuitenkin huomattava, että optimitilanteesta (3.38C) aloittaminen ei ole tarkoituksenmukaista, koska siinäkin tapauksessa jossain määrin ratapölkyn päihin keskittynyt kuormitus aiheuttaa miljoonia kertoja toistuessaan väistämättä aina jonkin suuruisia pysyviä muodonmuu-

toksia ratapenkereeseen. Näihin muodonmuutoksiin on syytä varautua, mistä syystäärkevin tuenta lähtötilanteessa olisi kuvassa 3.38 esitetyistä likimäärin tilanne B, tai jopa siitä hieman tilanteen A suuntaan, joskin tällöin mahdollistetaan raideseppelin hienonemisen keskittyminen ratapölkyn päiden alueelle.

3.2.3.2 Kokoavia päätelmiä tukikerroksen vaikutuksesta

Kolmessa neljästä *sepelitukikerroksella* tehdystä kokeesta tarkastelun ongelmana oli lähtötilanne, jossa ratapölkky kantoi selvästi keskeltä. Esitettyyn ajatusmalliin osittain sidottuina päätelminä sepelitukikerros todettiin kuitenkin tulosten perusteella ratapölkyn taivutusrasituksen kannalta hyvän tuen tarjoavaksi alustaksi. Tähän päätelmään vaikutti voimakkaasti yksittäinen koe, joka kantoi kokeen aluksi voimakkaasti päistään, mutta päät kykenivät kantamaan kuormituksen varsin hyvin ja tuennan keskittyminen ratapölkyn päihin säilyi. Huomattavaa on myös se, että lähtötilanteessa voimakkaasti keskeltä kantaneessa kokeessa (maksimi venymä 0.000410 mm/mm) venymäliuska säilyi ehjänä, eli halkeaman syntyyn vaadittava venymä ei ilmeisesti liittynyt.

Osasepelöinnin suoriutuminen tehtävästään vaikutti yleisesti ottaen varsin hyvältä. Osasepelöinti kykeni säilyttämään ratapölkyn venymätasot suhteellisen alhaisina ja niiden lisääntyminen kokeen lopussa oli enää hyvin hidasta. Suurilla liikennemäärillä tai raskaammilla kalustoilla venymät saattaisivat kuitenkin edelleen kasvaa.

Soratukikerroksella tilanne voitiin havaita selvästi heikoimmaksi, mutta toisaalta ajatusmallin nojalla todennäköisesti tyydyttäväksi. Venymät kasvoivat kokeen edetessä selkeästi niissä kokeissa, joissa pölkky oli kokeen alussa kantanut päistään. Vaikutti kuitenkin siltä, että venymien kasvu pysähtyi noin 0.000170 mm/mm tasolle, jolloin esijännityksen ansiosta kaikilla ratapölkkytyypeillä säilyttiin ilmeisesti tilanteessa, jossa vetojännityksiä ei 10-20 Mbrt:n junakuormitusta vastaavien kokeiden aikana muodostunut. Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että ratapenkereen leviäminen ei ollut todellisen ratapenkereen mukaisella tavalla mahdollista. Lisäksi päätelmät rajautuvat kokeissa käytettyyn kuormitustasoon, joka pyrittiin valitsemaan 20 t staattista akselikuormaa vastaavaksi.

Soratukikerroksen osalta on huomioitava myös, että sen alla alusrakenne on selvästi sepelitukikerroksen alla olevaa alusrakennetta alttiimpi pysyville muodonmuutoksille. Tällöin etenkin heikolla alusrakenteella ratapölkyn rasitusten lisääntyminen voi tapahtua soratukikerroksen epäsuorana vaikutuksena alusrakenteen painumien kautta.

Koetuloksista voidaan todeta, että asennusalustan tasaisuuden vaikutus ulottuu kokeessa varsin pitkälle, joissakin tapauksissa koko kokeen ajan, eli enimmillään noin 20 Mbrt liikennekuormitusta vastaavaan kuormitukseen asti. Tämä tarkoittaa sitä, että tukikerroksen rakentamisessa ja pölkynvaihdoissa asennusalustalla on huomattavaa merkitystä. Erityisesti tämä tulee huomioida kaivurimenetelmällä tehtävässä pölkynvaihdoissa ja siihen liittyvässä raiteen tukemisessa.

Ongelmallisin tilanne on silloin, kun ratapölkyn alustan jäykkyys ei ole ratapölkyn suunnassa tasainen. Tällainen tilanne voi syntyä ratapenkereen rajallisen leveysulottuvuuden vaikutuksesta. Tilanne on mahdollinen myös silloin, jos raideseppeli on tukemiskoneen tai aiemmin ratapölkyn päihin keskittyneen kuormituksen vaikutuksesta voimakkaasti hienontunut tai löyhtynyt ratapölkyn päissä, mutta raiteen keskellä säilynyt suhteellisen karkearakeisena. Hienorakeistuneen tukikerroksen jäykkyys on alentunut, jolloin tukikerros ei pölkyn päissä kykene kantamaan enää edes ratapölkyn

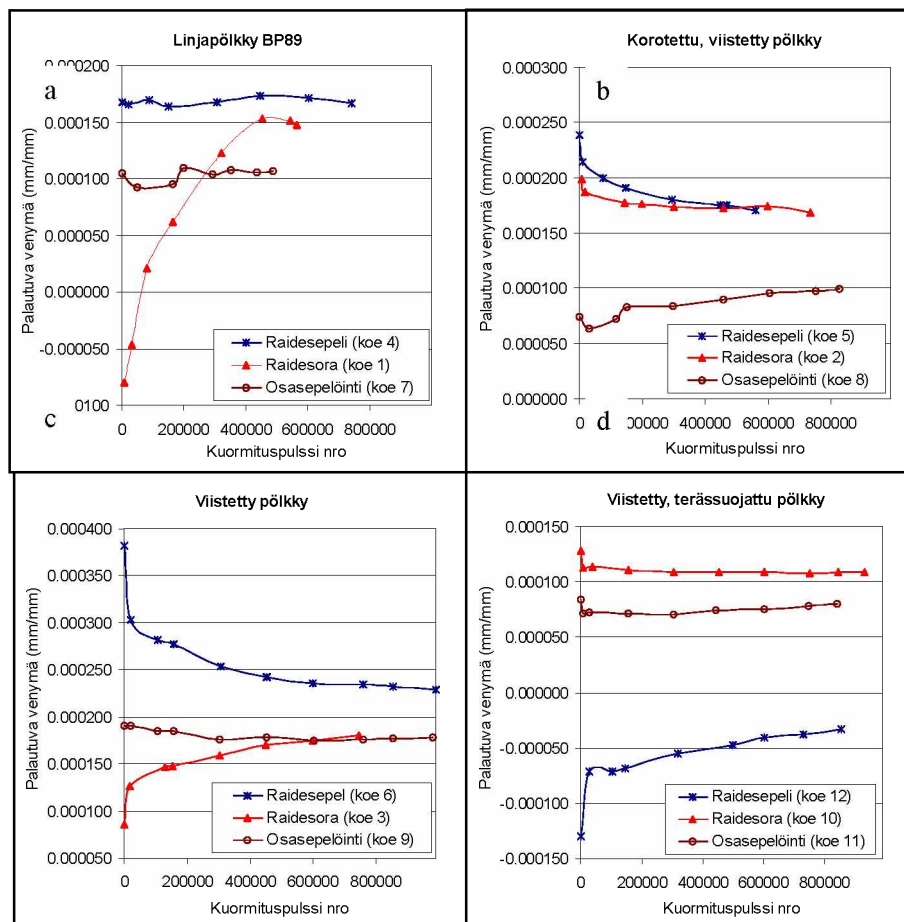
pinnalle tasaisesti jakaantunutta kuormitusta, vaan kokoonpuristuu kuormituksen alla enenevästi. Rajallinen pengerleveys ja epätasainen raideseppelin hienoneminen ovat raiteen keskelle keskittyvän routanousun ohella mahdollisia perusteita sille, että ratapölkyn tuenta raiteen keskellä voi muodostua suuremmaksi kuin ratapölkyn päisä.

3.2.3.3 Kokoavia päätelmiä ratapölkkytyypin vaikutuksesta

Kokeissa saatiin viitteitä siitä, että vertailussa olleista ratapölkkyistä parhaaseen tulokseen soratukikerroksessa päästään terässuojatulla ratapölkkyllä, jonka viiste oli tarkastelluista prototyypeistä korkein ja pisin, vrt. kuva

3.39. Linjaratapölkyn ja vähemmän viistettyjen ratapölkkyjen välillä ei voitu havaita systemaattisia eroja. Vaikutti myös siltä, että viistetty terässuojattu ratapölkky toimii hyvin myös sepelitukikerroksella.

Merkittävä huomio on se, että esijännityksen ansiosta kaikilla ratapölkkytyypeillä säilyttiin ilmeisesti tilanteessa, jossa vetojännityksiä ei 10-20 Mbrt:n junakuormitusta vastaavissa kokeissa muodostunut, mikäli pölkyn asennusalue ei ollut lähtötilanteesta keskeltä kantava. Keskeltä kantaneissa tapauksissakin venymä pieneni toistokuormituksen myötä. On huomattava, että kokeet tehtiin staattisesta 20 t akselikuormasta aiheutuvaksi arvioidulla kuormitustasolla, joten suurempien kuormien vaikutusta ei voida ennustaa.



Kuva 3.39 Ratapölkyn yläpinnan palautuvan venymän kehittyminen eri pölkkytyypeillä.

Yhteenveto

Kokeiden tavoitteena oli arvioida tukikerroksen vaikutusta ratapölkyn kohtaamaan taivutusrasitukseen sekä erityisesti arvioida soratukikerroksessa käytettäväksi soveltuvia ratapölkkyymalleja. Kokeissa mitattiin ratapölkyn venymiä ja pystysiirtymiä sekä venymiä tukikerroksen alapuolisessa hiekassa. Kaikki mittaustulokset yhdessä muodostivat kokonaisuuden, josta ratapölkyn ja tukikerroksen yhteistoimintaa voitiin arvioida varsin kattavasti.

Ratapölkyn yläpinnan venymä havaittiin suurelta osin määrittyväksi kiskoja vierestä ja raiteen keskeltä mitattujen palautuvien siirtymien erotuksen perusteella. Kokeissa havaittu tyypillinen 0,5 mm taipuma aiheutti noin 150 μ m/m venymän ratapölkyn yläpinnalle. Oleellista koetulosten tarkastelussa oli havaita, että ratapölkyn venymän kehittyminen kokeen edetessä yhdessä lähtötilanteen venymän kanssa luovat edellytykset ratapölkyn saaman tuennan ja ratapenkereen pysyvien ja palautuvien muodonmuutosten arvioinnille.

Koetulosten analysoinnin perusteella esitettiin ajatusmalli ratapölkyn tukikerroksesta saaman tuennan ja ratapenkereen muodonmuutosten riippuvuudesta. Lähtötilanteessa ratapölkyn tulisi jossain määrin kantaa päistään, jolloin kuormituspulssi aiheuttaa ratapölkyn yläpinnalla puristumaa. Mikäli tukikerros ja muu ratapenger ei kykene kantamaan keskittynyttä kuormitusta, tälle alueelle muodostuu toistokuormituksessa pysyviä muodonmuutoksia, eli ratapenger hieman painuu. Pysyvän muodonmuutoksen seurauksena ratapölkky pääsee seuraavien kuormituspulssien aikana taipumaan päistään alaspäin, jolloin ratapölkyn tuenta siirtyy enenevästi raiteen keskustan suuntaan aiheuttaen samalla puristuman muuttumisen venymäksi ratapölkyn yläpinnalla raiteen keskellä.

Päätelmänä edellisistä tarkasteluista voidaan todeta, että ratapenkereen *palautuvan* muodonmuutoksen ero ratapölkyn suunnassa (ja mahdollinen tyhjätila ratapölkyn ja tukikerroksen välillä) määräävät ratapölkyn *taipuman suuruuden*. Taipumatilanteen muuttuminen edellyttää ratapölkyn suunnassa epätasaisia ratapenkereen *pysyviä* muodonmuutoksia, jotka siis määräävät *taipuman kehittymisen* toistokuormituksen edetessä.

Ajatusmallin mukaan tilanne voi ratapölkyn suunnassa tasalaatuisessa rakenteessa edetä enintään siihen, että ratapölkyn alapinnan tuenta on tasaisesti jakautunut koko alalle, koska kyseisessä tilanteessa ei ole perusteita epätasaisen pysyvien muodonmuutosten syntymiselle. Eteneminen vielä tästä, eli muuta alaa suurempi tuenta raiteen keskellä, edellyttäisi, että ratapölkyn päissä oleva rakennekerros on jäykkyydeltään heikompi. Tällainen jäykkyysero voidaan ajatella mahdolliseksi ainakin ratapenkereen rajallisen leveysulottuvuuden vaikutuksesta sekä silloin, kun tukemiskone ja aiemmin ratapölkyn päihin keskittynyt kuormitus on hienontanut tukikerrosateriaalia miltei ainoastaan ratapölkyn päistä. Lähinnä vähäliikenteisillä rataosilla mahdollinen ratapölkyn keskeltä kantamista lisäävä tekijä on myös raiteen keskelle painottuva routanousu.

Useimpien sepelitukikerroksella tehtyjen kokeiden osalta tarkastelun ongelmana oli lähtötilanne, jossa ratapölkky kantoi selvästi keskeltä. Esitettyyn ajatusmalliin nojautuvina päätelminä sepelitukikerros todettiin tulosten perusteella ratapölkyn taivutusrasituksen kannalta hyvän tuen tarjoavaksi alustaksi. Samoin osasepelöinti kuitenkin sillä varauksella, että akselipaino ei ole kokeissa käytettyä suurempi ja rataosan lii-

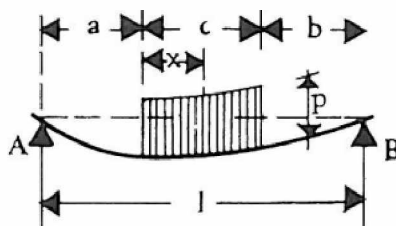
kennemäärät eivät ole kovin suuria. Soratukikerroksella tilanne voitiin havaita selvästi heikoimmaksi, mutta toisaalta ajatusmallin nojalla todennäköisesti tyydyttäväksi. Soratukikerroksella korostuu alusrakenteen kantavuuden tärkeys. Vaikutti siltä, että esijännityksen ansiosta kaikilla ratapölkkytyypeillä säilyttiin ilmeisesti tilanteessa, jossa vetojännityksiä ei 10-20 Mbrt:n junakuormitusta vastaavien kokeiden aikana muodostunut, mikäli pölkyn asennusalue ei ollut lähtötilanteessa keskeltä kantava.

Ratapölkkytyypeistä keskikohdan alapinnan korkeimmalla ja pisimmällä viisteellä varustettu teräsuojattu ratapölkky vaikutti parhaalta erityisesti soratukikerrosta ajatellen, mahdollisesti myös muilla tukikerroksilla. Muilla, vähemmän viistetyillä prototyypeillä ei havaittu systemaattista eroa linjaratapölkkyyn BP99, mutta kaikkien toiminta arvioitiin todennäköisesti tyydyttäväksi.

3.2.4 Kuormitustestaus erilaisilla tukikerroksilla: laskennallinen vertailu

3.2.4.1 Taipumamittaustulosten arviointi Rakentajain kalenterin mitoituslausekkeella

Vertaileva taipumalaskenta tehtiin ensin Rakentajain kalenterissa esitettyjen palkin mitoituslausekkeiden avulla. Rakennekuva käännettiin vastakkaiseksi, eli viivakuormasta tuli pohjapaine ja tukireaktioista kuormituskohtat. Kuvassa 3.40 on esitetty mitat, symbolit, viivakuorma p (pölkkyssä pohjapaine) ja tukireaktiot A ja B (pölkkyssä kuormitus). Laskentamallissa ei huomioida kiskojen ulkopuolisia ratapölkkyyn ulokeosuuksia, ja kiskojen kohtien tukireaktiot ovat myös taipumien nollakohdat.



Kuva 3.40 Rakentajain kalenterin (v. 1998 s. 45) palkin mitoituslausekkeiden rakennokuva.

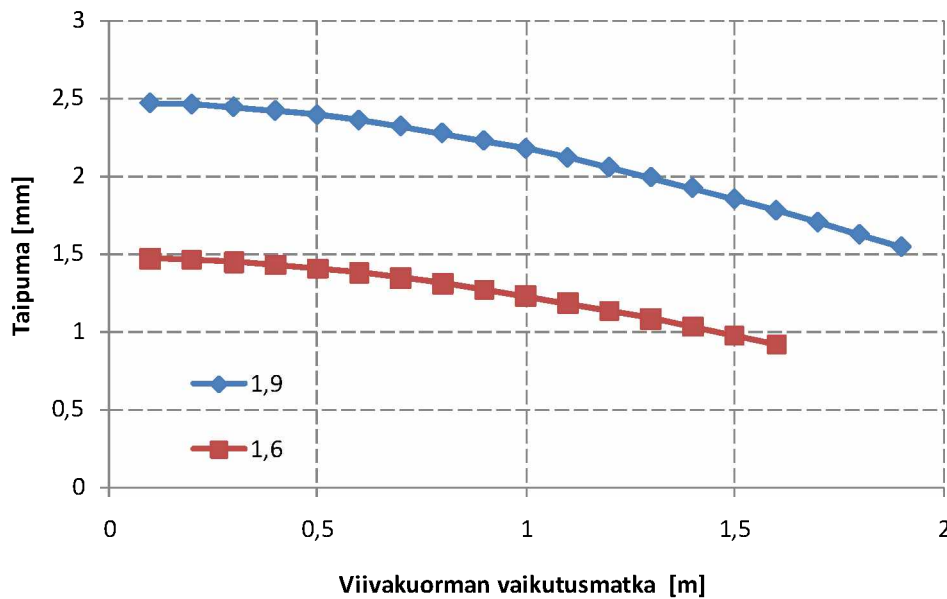
Taipuma f , lauseke numero 2 (Rakentajain kalenteri):

$$\max f \approx \left(5 \frac{l}{c} - 12 \frac{a^2 + b^2}{lc} + 8 \frac{a^4 + b^4}{l^3 c} \right) \frac{Pl^3}{384 EJ}$$

Maanvaraisen palkin pituudeksi on valittu joko arvioitu siirtymämittareiden keskinäinen etäisyys tai kuormituskohtien väli. Laskennan lähtöarvoja:

L	1,9 tai 1,6	m "painumamittauspisteiden väli" tai "kuormituspisteiden väli"
P	100000	N "Voima ratapölkkyä kohti"
E	38700000000	N/m ² "Pölkyn kimmomoduuli"
J (I)	0,00015	m ⁴ "Pölkyn jäyhyysmomentti", keskiarvo

Vakiopystykuormalla 100 kN saatava maksimitaipuma, kun kuorma vaikuttaa eri pituuksilla, on esitetty kuvassa 3.41.



Kuva 3.41 Vakiopystykuormalla 100 kN saatava painuma jännevälien 1,9 m ja 1,6 m keskikohdalla, kun kuorma vaikuttaa eri pituuksilla jännevälän keskellä.

Näillä oletuksilla saadaan kuorman jakaantumispituudelle melko pieni merkitys. Jos koko matkalla on viivakuorma (-tuenta) (tässä $100\text{ kN}/1,9\text{ m}=52,6\text{ kN/m}$), saadaan vain noin 37 % pienempi painumaero eli taipuma verrattuna 100 kN keskeisen pistekuorman (-tuen) tapaukseen. Tähän ilmiöön ei vaikuta jännevälän suuruus.

Parman ratapölkylle BP99 on TTY:n testeissä saatu taulukon 3.7 mukaisia palautuvia pystysiirtymiä, kun pulssien lukumäärä oli välillä 100 000 – 650 000 (keskitaso).

Taulukko 3.7 Ratapölkyn pystysiirtymämittausten tuloksia kokonaiskuormalle 100 kN/ratapölkky [mm] (Nurmikolu 2007, vrt. taulukko 3.6).

Koenumero	Keskiarvo kiskojen vieressä	Raiteen keskellä	Painumaero = taipuma
4 (raidesepeli)	1,21	0,67	0,54
7 (osasepelöinti)	1,27	0,86	0,41

Laskennallisesti saatiin 1,6 m pitkälle maanvaraiselle palkille taipumaksi 1 mm, kun 100 kN kokonaiskuormituksen tuenta eli pohjapaine oli jaettu tasan 1,5 m matkalle (kuva 3.41). Mitattu taipuma oli noin 0,5 mm (taulukko 3.7), kun kuormituskohtien väli oli noin 1,6 m ja painumamittauskohtien väli noin 1,9 m. Yksinkertaisen laskennan avulla (kuva 3.40) jättäen huomioimatta kiskojen ulkopuoliset osuudet saatiin siis mittaustuloksia suurempia taipumia. Suurimpana syynä tähän eroon oli 0,5 m pitkien ulokkeiden vaikutus. Nämä ulokkeet eli kiskojen ulkopuoliset osuudet ratapölkkyssä aikaansaivat vastakkaisen taivutusmomentin, mikä pienensi keskialueen taivutusta ja täten myös taipumaa. Lisäksi painumien mittauskohdat olivat hieman ulokkeen puolella, joten tarkkaa tietoa nimenomaan kuormituskohtien painumista ei ole käytössä. Myös kuormituksen suuri nopeus saattoi hieman vaikuttaa tuloksiin. Nämä tekijät huomioon ottaen voidaan todeta, että kuormituskokeissa mitattujen taipumien suuruusluokkaa voidaan pitää laskelmin perusteltuna.

3.2.4.2 Taipumamittaustulosten vertailu 2D-FEM-laskentojen tuloksiin

Mitattuja taipumia verrattiin myös liitteessä 3 laskettuihin taipumiin. Taulukon 3.8 tapauksessa 1 tukikerros tarjoaa jäykän tuen koko ratapölkyn alapinnan matkalle ja tapauksessa 5 ratapölkyn päissä 0,7 m matkalla raidesepelin jäykkyys on vain 1/100 keskiosan jäykkyydestä. Tapaukset 2... 4 ovat näiden kahden ääritapauksen välillä. Tapauksien 2 ja 3 taipumat vastaavat parhaiten 1,9 m matkalla mitattua todellista taipumaa, joten voidaan karkeasti arvioida, että näissä kuormituskokeissa ratapölkyn päissä oli tuennan jäykkyys vain noin 1/3... 1/10 keskiosan jäykkyydestä, jos maakerrosten ominaisuudet laskennassa vastaavat kokeiden maakerroksia. Todellisuudessa syklisissä kokeissa lienee pölkyn päissä pohjan ja maan väliin muodostunut rako.

Taulukko 3.8 Yhteenveto ratapölkkyjen Plaxis 2D-laskentojen taipuma- ja jännitystuloksista. Tässä todellisen betonikimmokertoimen mukaiset ratapölkyn yläpinnan veto- ja puristusjännitykset.

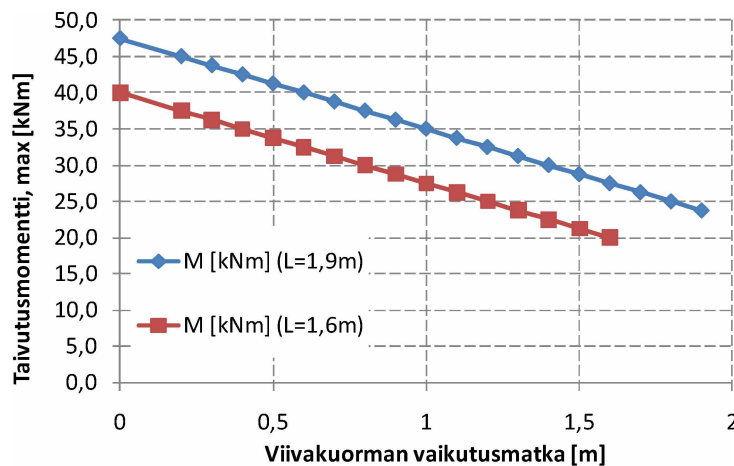
Tapaus	Pölkyn taipuma koko pituudella [mm]	Pölkyn keskiosan yläpinnan jännitys [MPa]	Pölkyn kiskon kohdan yläpinnan jännitys [MPa]
1	0,15	0,4	-4,5
2	0,25	2,3	-4,0
3	0,94	6,4	-3,1
4	0,86	5,8	-3,1
5	3,54	15,0	-1,0
6	0,26	2,7	-4,0
7	2,56	20,2	-1,4
11	3,88	23,5	-0,9
12	3,10	23,3	-1,0
13	3,24	23,1	-1,0
14	3,22	22,9	-1,0
21	-0,19	0,06	-4,7
22	-0,19	-0,03	-4,7
23	-0,20	-0,03	-4,7
24	-0,20	-0,06	-4,7

FEM-laskennassa tuentamatka radan suunnassa on 0,61m/pölkky eli ko. tuentamatka on $0,61\text{m}/0,2585\text{m} = 2,36$ -kertainen todelliseen nähden. Tämä vaikuttaa merkittävästi vain noin 350 mm syvyydelle ratapölkyn alapuolelle, jos pystyjännitys jakaantuu tukikerroksessa suhteessa 2:1.

Taulukon arvot on laskettu jatkuvalle kokonaiskuormalle $250\text{ kN/m} \cdot 1,46 = 365\text{ kN/m}$. Ratapölkkyä kohden siis saadaan pystykuorma $0,61\text{m} \cdot 365\text{ kN/m} = 223\text{ kN}$. Kun huomioidaan 2D-FEM-mallin koetta suurempi kuorma ($223\text{ kN}/100\text{ kN}$), voidaan todeta 2D-FEM-laskentatulosten tapauksissa 3 ja 4 karkeasti vastaavan taulukossa 3.7 esitettyjen kuormituskokeen tuloksia.

3.2.4.3 Jännitysmittaustulosten arviointi Rakentajain kalenterin mitoituslausekkeella

Vakiopystykuormalla 100 kN saatava taivutusmomentti, kun kuorma vaikuttaa eri pituuksilla, on esitetty kuvassa 3.42.



Kuva 3.42 Vakiopystykuormalla 100 kN saatava taivutusmomentti jännevälien 1,9 m ja 1,6 m keskikohdalla, kun kuorma vaikuttaa eri pituuksilla jännevälän keskellä.

Parman ratapölkylle BP99 on TTY:n testeissä saatu taulukossa 3.9 esitettyjä palautuvia venymiä, kun pulssien lukumäärä oli välillä 100 000 – 650 000 (keskitaso).

Taulukko 3.9 Yhteenveto ratapölkyn palautuvista venymistä [mm/mm] ja vastaavista jännityksistä [MN/m²], kun ratapölkyn kimmomoduuli $E=38700 \text{ MN/m}^2$ (Nurmikolu 2007, vrt. taulukko 3.5).

Koenro	Venymä ϵ		Jännitys $\sigma = \epsilon \cdot E$	
	Yläpinnalla raiteen keskellä	Alapinnalla keskiarvo kiskojen alla	Yläpinnalla raiteen keskellä	Alapinnalla keskiarvo kiskojen alla
1 (raidesora)	0,000121	0,000051	4,7	2,0
4 (raidesepeli)	0,000169	0,000046	6,5	1,8
7 (osasepelöinti)	0,000102	0,000034	3,9	1,3
Keskiarvo	0,000131	0,000044	5,1	1,7

Ratapölkyn Parma BP99 taivutusvastus yläreunan suhteen keskikohdalla $W_o = 1006164 \text{ mm}^3$ ja alareunan suhteen $W_u = 1978746 \text{ mm}^3$, vrt. taulukko 2.7. Jännitys poikkileikkauksen reunalla $\sigma = M/W \Rightarrow$ taivutusmomentti $M = \sigma \cdot W$.

Mitattua vetojännitystä vastaava taivutusmomentti ratapölkyn keskikohdalla:

$$M_{\text{keski,yp}} = \sigma \cdot W = 5,1 \text{ N/mm}^2 \cdot 1006164 \text{ mm}^3 = 5,1 \text{ kNm}.$$

Mitattua vetojännitystä vastaava taivutusmomentti kiskon kohdalla:

$$M_{\text{kisko,ap}} = \sigma \cdot W = 1,7 \text{ N/mm}^2 \cdot 1978746 \text{ mm}^3 = 3,4 \text{ kNm}.$$

Mitatun venymän mukaan laskettu taivutusrasitus ratapölkkyssä on täten selvästi pienempi kuin Rakentajain kalenterin mitoituslausekkeilla laskettu taivutusmomentti ratapölkyn keskellä (kuva 3.42). Eron syyt ovat samat kuin painumalaskelmissa, ks. kohta 3.2.4.1. Suuruusluokka nämä syyt huomioiden on kuitenkin oikea.

3.2.4.4 Jännitysmittaustulosten vertailu 2D-FEM-laskentojen tuloksiin

Kuormituskokeissa havaittuja tuloksia (taulukko 3.9) voidaan verrata myös 2D-FEM-laskentojen tuloksiin (taulukko 3.8 ja liite 3). Mitattu jännitys sekä ratapölkyn keskikohdalla että kiskon kohdalla on samaa suuruusluokkaa kuin FEM-laskennan tapausten 3-5 tulokset huomioiden kohdassa 3.2.4.2 kerrottu kuormituksen eroavaisuus ja 2D-laskennan karkeus 3D-todellisuuden kuvaamisessa.

3.3 Valtimon koekohde vähäliikenteisten ratojen kunnostamiseksi

Vähäliikenteisten ratojen kunnostamisen vaihtoehtojen tutkimiseksi Valtimoon, rataosalle Porokylä-Vuokatti, rakennettiin vuonna 2006 koekohde. Koekohteelle rakennettiin neljä 500 m pitkää osuutta. Koeosuudella käytettiin kahta eri tukikerrosmateriaalia ja kahta eri betoniratapölkkyä tyyppiä. Tukikerrosmateriaaleina olivat raidesora ja raidesepeli. Raidesepelikerroksen paksuus oli 350 mm korkeusviivasta. Taulukossa 3.10 on esitetty eri osuuksilla käytetyt tukikerrosmateriaalit ja pölkkyt.

Taulukko 3.10 Valtimon koeosuus ja käytetyt rakenneratkaisut.

Alku km+m	Loppu km+m	Tukikerros	Pölkkyt
809+160	809+660	Raidesora	B97
809+660	810+160	Raidesora	Soraraidepölkky BP99
810+160	810+660	Raidesepeli 350 mm	Soraraidepölkky BP99
810+660	811+160	Raidesepeli 350 mm	B97

Koekohteessa käytetyt soraraidepölkkyt olivat Parman valmistamia ja ne olivat muotoiltu keskiosaltaan terävämmiksi verrattuna perinteiseen betonista valmistettuun linjaratapölkkyyn. Muotoilun tavoitteena oli vähentää pölkyn tukeutumista keskiosastaan. Linjaratapölkkyä edusti Lujan valmistama B97. Kiskotuksena osuudella käytettiin 54 E1 kiskoja, jotka olivat 50 m pitkiä, eli osuudella oli ns. pitkäkiskoraide. Kuva 3.43 esittää koeosuutta, jossa oli B97 pölkkyt ja 350 mm sepelitukikerros. Kyseinen osuus sijaitse vesistön yli rakennetun penkereen päällä.



Kuva 3.43 Koeosuus, jossa on B97-pölkyt ja paksuudeltaan 350 mm oleva sepelikutikerros.

Koekohde rakennettiin purkamalla vanha päällysrakenne 350 mm syvyydelle korkeusviivasta alaspäin. Tämän päälle asennettiin raide, joka sorastettiin/sepelöitiin raiteen päältä sepelöintivaunulla. Lopuksi raide nostettiin suunniteltuun korkeusasemaan tukemiskoneen avulla.

Rakentamisen jälkeen koekohteella on tehty koneellinen tukeminen kahdesti. Tukemiset on tehty vuonna 2009 ja 2010.

3.3.1 Koejärjestelyt

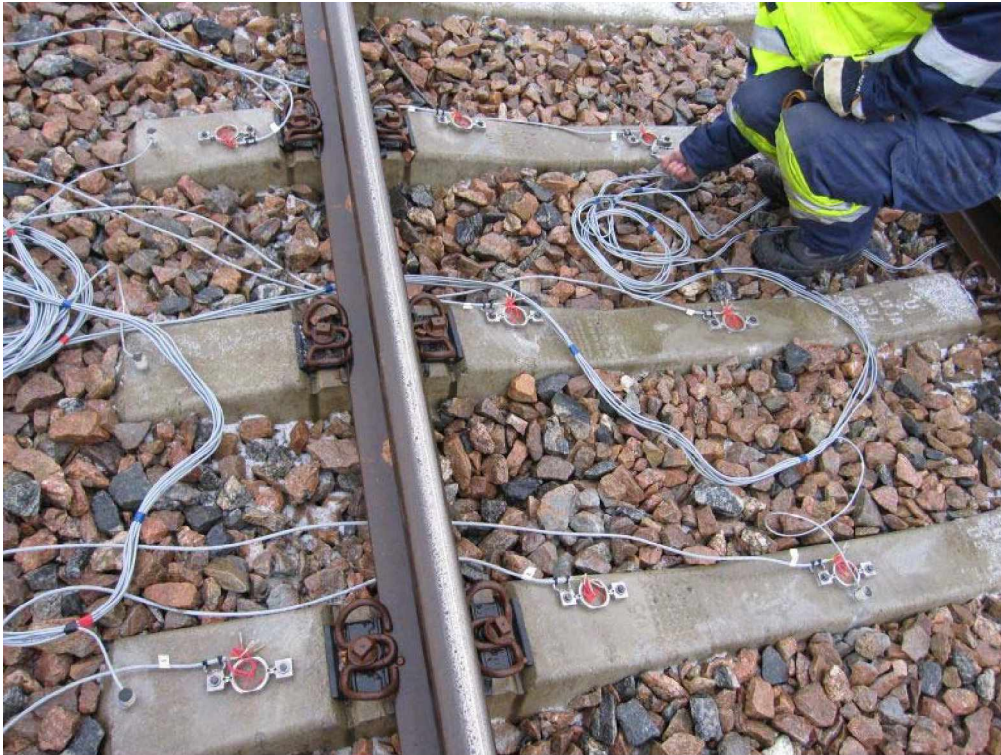
Koeosuudella tehtiin kävelytarkastus mahdollisten vaurioiden havaitsemiseksi. Ratapölkyissä ei silmämääräisesti havaittu halkeamia. Ainoat havaitut vauriot olivat yksittäiset pienehköt betonikappaleiden lohkeamat pölkyissä. Pölkkyyväli vaihteli noin 550-630 mm välillä ja jatkospölkkyyväli noin 500-530 mm välillä. Koeosuuksilla, joissa tukikerroksena oli raidesora, oli havaittavissa vähäistä kasvillisuutta, kuten kuvasta 3.44 voidaan huomata.



Kuva 3.44 Koeosuuden soratukikerroksellisella osuudella havaittua kasvillisuutta.

Koekohteella mittapisteiden ylityksiin käytettiin Tka 8 ratakuorma-autoa. Tka 8 käytön syynä olivat vähäiset liikennemäärät rataosalla. Esimerkiksi Valtimon koekohteella kulki keskimäärin kaksi tavarajunaa vuorokauden aikana. Tka 8 suurin akselipaino on 17 t ja kokonaismassa 34 t. Jokainen mittapiste ylitettiin neljä kertaa. Kahden ensimmäisen ylityskerran aikana ratakuorma-auton nopeus oli noin 30 km/h ja kahden viimeisen noin 60 km/h. Lisäksi hyväkuntoisen kisko jatkoksen kohdalla jouduttiin tekemään kaksi ylitystä noin 10 km/h nopeudella ja huonokuntoisen kisko jatkoksen kohdalla kaksi ylitystä noin 10 km/h ja kaksi ylitystä noin 5 km/h.

Ratapölkkyjen rasituksia mitattiin kahdeksalla venymäsilinällä ja pölkyn pysytysuuntaista siirtymää kahdeksalla kiihtyvyyssanturilla. Anturit olivat sijoiteltu kuvan 3.45 mukaisesti. Venymäanturit sijoitettiin kolmeen peräkkäiseen pölkkyyn kuvan mukaisesti. Kiihtyvyyssantureista kuusi sijaitsi kolmen peräkkäisen pölkyn päissä ja kaksi reunimmaisten pölkkyjen keskellä. Jatkoskohtien mittapisteissä kiihtyvyyssanturit sijaitsivat kahdeksan peräkkäisen pölkyn päässä. Valtimon suunnasta lähestyttäessä kiihtyvyyssantureista kolme sijaitsi ennen jatkosta ja viisi jatkoksen jälkeen.



Kuva 3.45 Valtimon koekohteella käytetty mittausjärjestely.

Mittaukset tehtiin 16-17.11.2011. Mittausten tarkoituksena oli selvittää pölkkyihin kohdistuvia rasituksia ja tätä kautta vallitsevaa pohjapainejakautumaa erityyppisillä betoniratapölkkyillä eri tukekerrosmateriaalien kanssa.

Koekohteesta otettiin kolme tukikerrosnäytettä (kuva 3.46) jokaista eri koerakennetta kohden eli tukikerrosnäytteitä otettiin yhteensä 12 kpl. Näytteenottopaikat sijaitsivat mittapisteiden välittömässä läheisyydessä. Tukikerrosnäytteet pesuseulottiin rakeisuuden määrittämistä varten. Rakeisuuskäyrät ovat esitetty liitteessä 4.



Kuva 3.46 Näytteenottopaikka soratukikerrososuudella.

Rataosalla mitattiin hyväkuntoinen ja huonokuntoinen jatkos. Kuvassa 3.47 on esitetty mitattu silmämääräisesti huonokuntoiseksi arvioitu jatkos ja kuvassa 3.48 on esitetty mitattu silmämääräisesti hyväkuntoiseksi arvioitu jatkos.



Kuva 3.47 Mitattu huonokuntoinen jatkos.



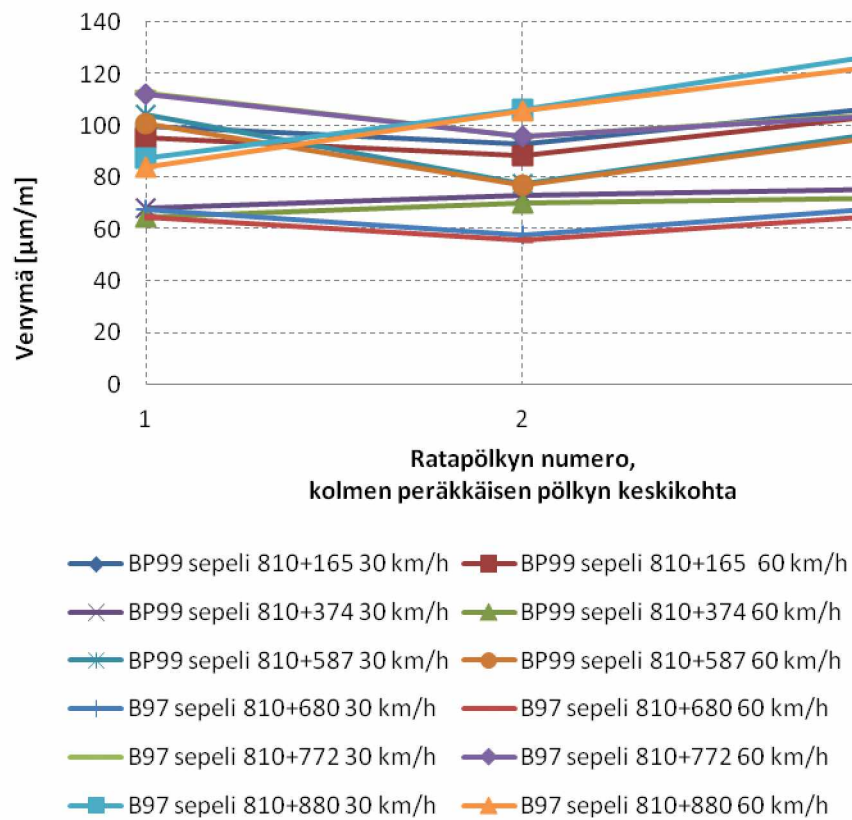
Kuva 3.48 Mitattu hyväkuntoinen jatkos.

3.3.2 Mitatut venymät sepelitukikerros

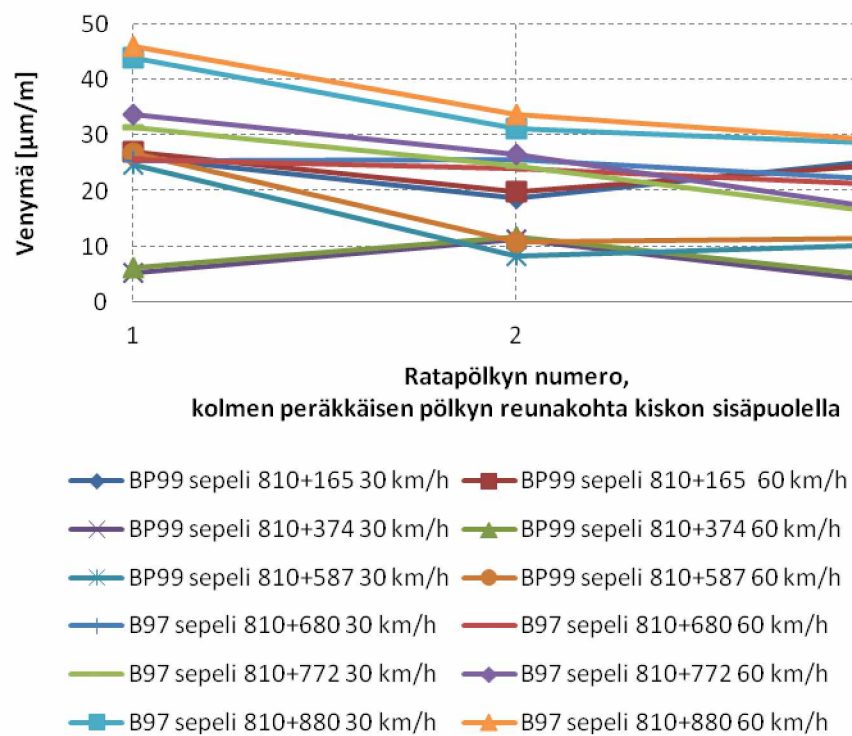
Taulukko 3.11 esittää koeosuudella mitattujen venymien keskiarvot. Jokaisessa mittapisteesä ylityksiä tehtiin kaksi nopeudella 30 km/h ja kaksi nopeudella 60 km/h. Taulukossa on esitetty kahden samalla nopeudella tehdyn ylityksen keskiarvo. Kuva 3.49 esittää pölkyn keskiosasta mitatut venymät, Kuva 3.50 kiskon vierestä pölkyn keskeltä mitatut venymät ja Kuva 3.51 esittää pölkyn ulokkeen yläpinnasta mitatut venymät.

Taulukko 3.11 Betoniratapölkkyistä mitatut venymät sepelitukikerroksella.

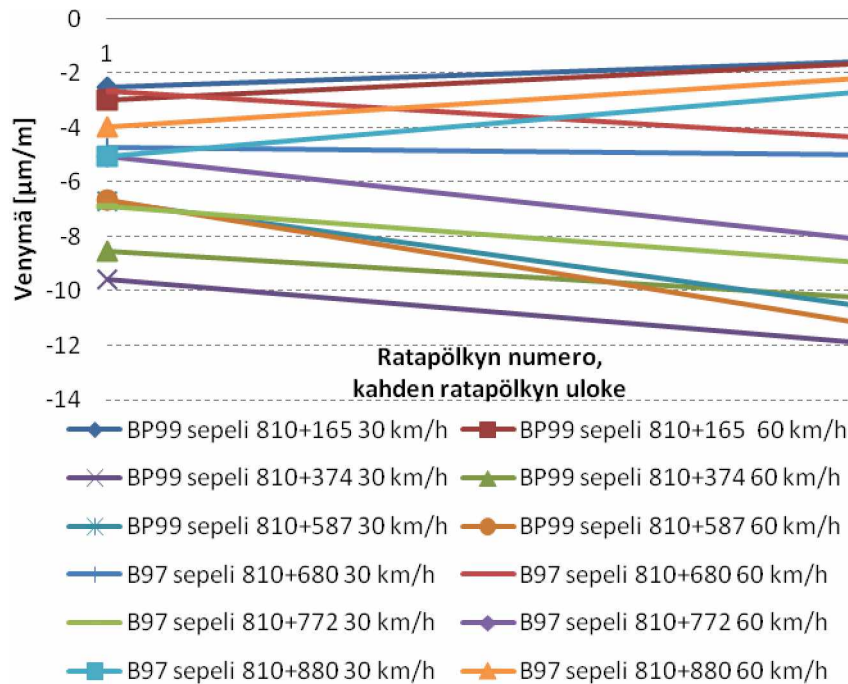
Keski kohta	810+165 BP99 sepeli		810+374 BP99 sepeli		810+587 BP99 sepeli		810+680 B97 sepeli		810+772 B97 sepeli		810+880 B97 sepeli	
	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60
	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h
Ratapölkky 1	100	95	68	65	105	101	68	65	113	112	87	84
Ratapölkky 2	93	89	73	70	78	77	58	56	96	96	107	106
Ratapölkky 3	108	105	75	72	98	97	69	66	105	105	129	124
Keskiarvo	100	96	72	69	93	92	65	62	105	104	108	105
Kiskon vieri												
Ratapölkky 1	26	27	5	6	25	27	26	26	32	34	44	46
Ratapölkky 2	19	20	11	12	8	11	26	24	24	27	31	34
Ratapölkky 3	26	25	3	4	10	12	22	21	16	17	28	29
Keskiarvo	24	24	7	7	14	16	24	24	24	26	35	36
Uloke												
Ratapölkky 1	-3	-3	-10	-9	-7	-7	-5	-3	-7	-5	-5	-4
Ratapölkky 3	-2	-2	-12	-10	-11	-11	-5	-4	-9	-8	-3	-2
Keskiarvo	-2	-2	-11	-9	-9	-9	-5	-4	-8	-7	-4	-3



Kuva 3.49 Mitatut venymät ϵ_{ke} ratapölkyn keskellä yläpinnassa.



Kuva 3.50 Mitatut venymät ϵ_{ki} yläpinnassa reunalla kiskojen välissä.



Kuva 3.51 Mitatut venymät ϵ_{ul} ulokkeella yläpinnassa.

Kuvaajien mukaan mitatut venymät vaihtelivat jonkin verran mittauspisteestä ja pölkystä riippuen. Suurin pölkyn keskeltä mitattu venymä oli 129 $\mu\text{m/m}$ ja pienin 56 $\mu\text{m/m}$. Suurin ja pienin venymä oli B97-pölkylä.

Mitattujen venymien, pölkyn mittauspisteen poikkileikkauksen taivutusvastuksen ja oletetun betonin kimmokertoimen avulla pystytään määrittämään taivutusmomentti. Lisäksi mitattujen venymien suhteiden ja taivutusvastusten suhteiden avulla voidaan määrittää momenttien suhde. Momenttien suhteiden avulla pystytään määrittämään pohjapainejakauma.

Taulukko 3.12 esittää pölkyn keskellä kiskon vieressä ja pölkyn keskellä olevien momenttien suhteen ja Taulukko 3.13 esittää pölkyn ulokkeen ja pölkyn keskiosan momenttien suhteen.

Taulukko 3.12 Mitattu yläpinnan venymien suhde $\varepsilon_{ki}/\varepsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttien suhde M_{ki}/M_{ke} (kiskon vieripölkyn keskikohta) samalla nopeudella tehtyjen ylitysten keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	810+165 BP99 sepeli	810+374 BP99 sepeli	810+587 BP99 sepeli	810+660 B97 sepeli	810+772 B97 sepeli	810+880 B97 sepeli
Ratapölkky 1	0,272	0,087	0,250	0,387	0,291	0,525
Ratapölkky 2	0,213	0,160	0,123	0,438	0,267	0,305
Ratapölkky 3	0,240	0,052	0,112	0,321	0,154	0,226
Keskiarvo						
$\varepsilon_{ki}/\varepsilon_{ke}$	0,242	0,100	0,162	0,382	0,237	0,352
M_{ki}/M_{ke}	0,442	0,183	0,296	0,569	0,354	0,525

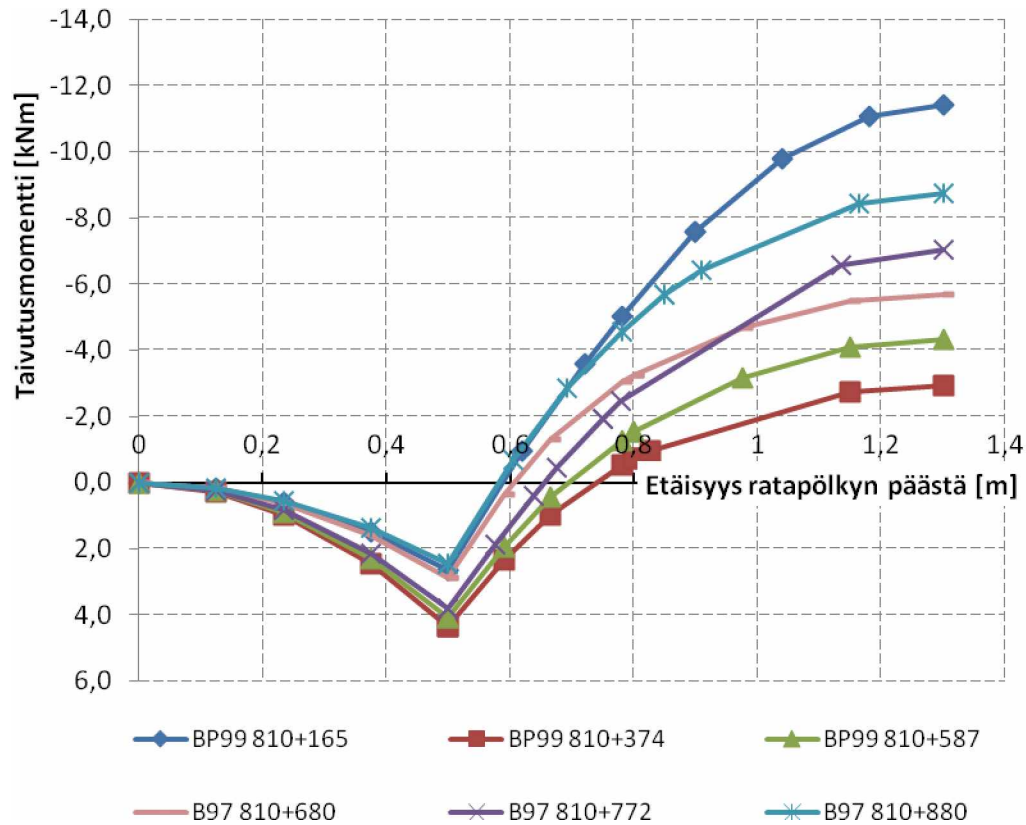
Mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ki}/M_{ke} = \varepsilon_{ki}/\varepsilon_{ke} \cdot W_{ki}/W_{ke}$ kyseisten pölkkytyyppien mukaisesti.

Taulukko 3.13 Mitattu yläpinnan venymien suhde $\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttien suhde M_{ul}/M_{ke} (uloke/pölkyn keskikohta) samalla nopeudella tehtyjen ylitysten keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	810+165 BP99 sepeli	810+374 BP99 sepeli	810+587 BP99 sepeli	810+660 B97 sepeli	810+772 B97 sepeli	810+880 B97 sepeli
Ratapölkky 1	-0,028	-0,136	-0,065	-0,056	-0,053	-0,052
Ratapölkky 3	-0,014	-0,151	-0,113	-0,070	-0,083	-0,018
Keskiarvo						
$\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$	-0,021	-0,144	-0,089	-0,063	-0,068	-0,035
M_{ul}/M_{ke}	-0,050	-0,335	-0,208	-0,113	-0,121	-0,063

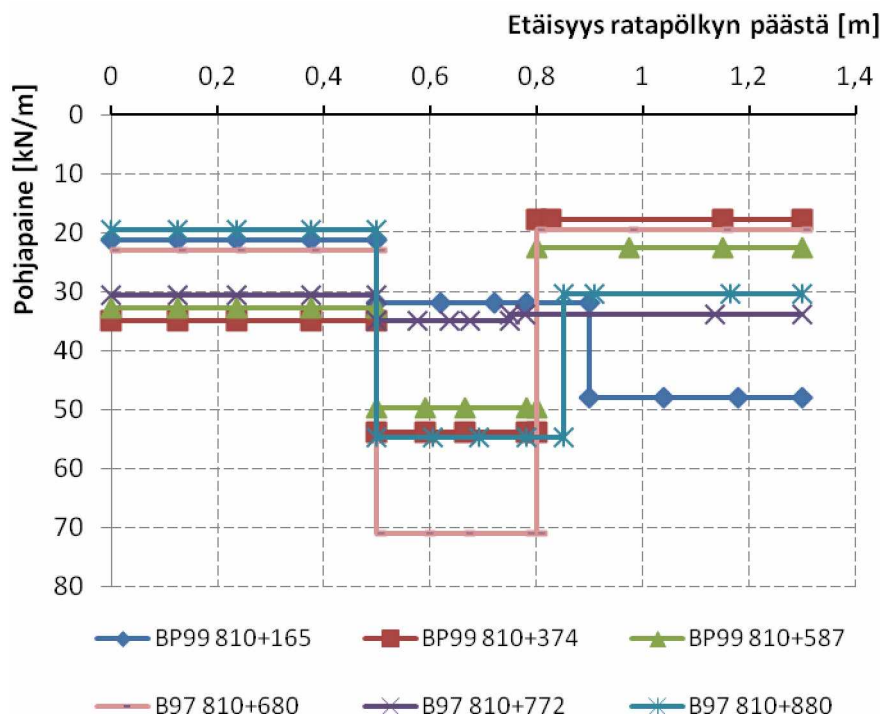
Mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ul}/M_{ke} = \varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke} \cdot W_{ul}/W_{ke}$ kyseisten pölkkytyyppien mukaisesti.

Kuva 3.52 esittää mitattujen taivutusmomenttien suhteiden mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja Kuva 3.53 esittää taivutusmomenttijakautumien mukaiset pohjapainejakautumat. Laskelmat on tehty vakiopyöräkuormalla $P = 42,5 \text{ kN}$ (kiskon kohta), joka on neljäsosa Tka8 akselipainosta.



Kuva 3.52 Mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakaumat.

Taivutusmomenttijakaumissa esiintyy jonkin verran hajontaa. Hajonta selittyy osittain sillä, että pyöräkuorma on jakautunut eri mittauspisteissä eri tavalla peräkkäisten ratapölkkyjen kesken. Pohjapainejakaumia määritettäessä on kuitenkin oletettu, että kuorman alla olevaan pölkkyyn kohdistuu 50 % akselipainosta. Näin ollen kuvajaan esittämät taivutusmomenttien arvot eivät ole absoluuttisia arvoja.



Kuva 3.53 Mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakaumat

Kuvaajista voidaan havaita BP99 pölkyn kantoivat keskiosaltaan hieman vähemmän kuin B97 pölkyn. Kuvaajista voidaan myös havaita, että suurin pohjapaine oli usein kiskon vieressä pölkyn keskellä. Keskiosaltaan eniten kantoi BP99 810+165, mikä on havaittavissa niin taivutusmomenttijakautumasta kuin pohjapainejakautumastakin. Venymien lisäksi ratapölkkyistä mitattiin pölkyn palautuvaa painumaa. Taulukko 3.14 esittää pölkyn päiden palautuvan painuman keskiarvon. Taulukosta voidaan havaita, että pölkyn päiden palautuvat painumat olivat lähes yhtä suuria kaikissa mittauspisteissä. Myöskään pölkkytyypillä ei mittausten perusteella ollut suurta merkitystä pölkyn päiden palautuvan painuman suuruuteen.

Taulukko 3.14 Pölkyn päiden palautuvan painuman keskiarvot (mm).

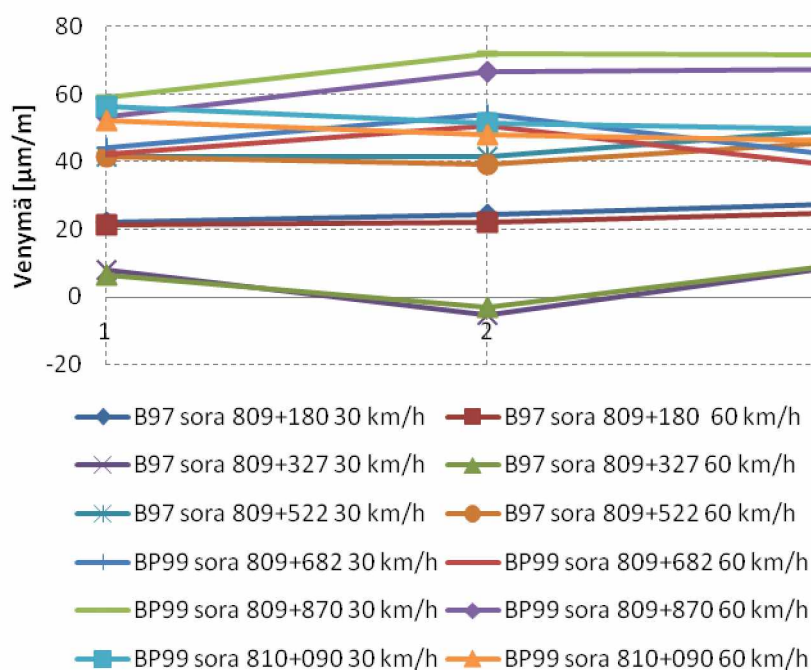
	BP99 sepeli 810+165	BP99 sepeli 810+374	BP99 sepeli 810+587	B97 Sepeli 810+660	B97 Sepeli 810+772	B97 Sepeli 810+880
Painuma	0,96 mm	0,77 mm	0,87 mm	0,71 mm	0,83 mm	0,89 mm

3.3.3 Mitatut venymät soratukikerros

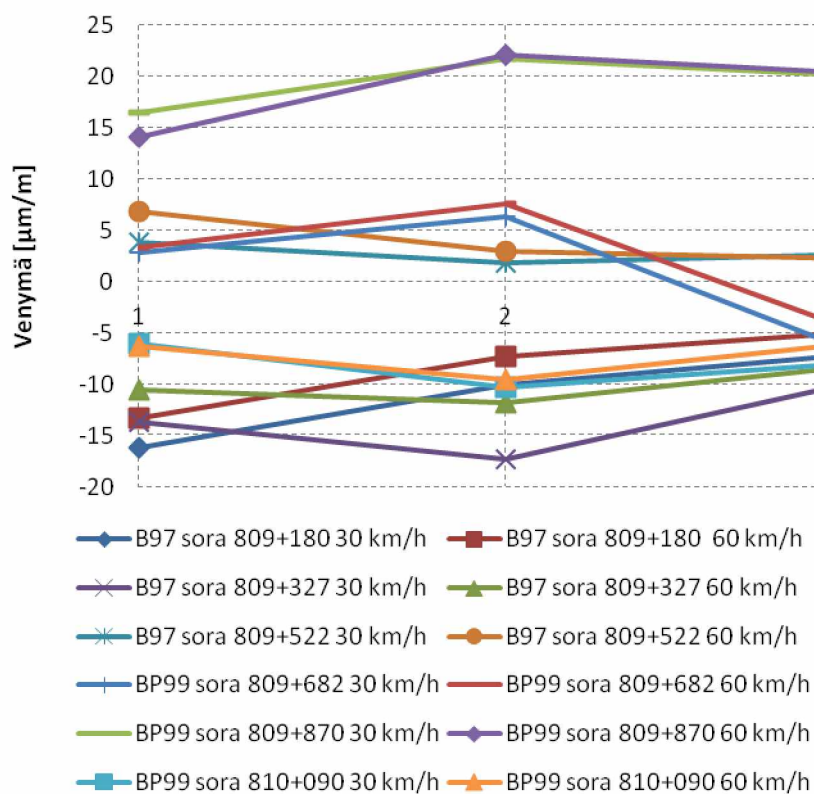
Taulukko 3.15 esittää soratukikerroksellisella koeosuudella mitattujen venymien keskiarvot. Jokaisessa mittapisteessä ylityksiä tehtiin kaksi nopeudella 30 km/h ja kaksi nopeudella 60 km/h. Taulukossa on esitetty kahden samalla nopeudella tehdyn ylityksen keskiarvo. Kuva 3.54 esittää pölkyn keskiosasta mitatut venymät, kuva 3.55 kiskon vierestä pölkyn keskeltä mitatut venymät ja kuva 3.56 esittää pölkyn ulokkeen yläpinnasta mitatut venymät.

Taulukko 3.15 Pölkyistä mitatut venymät ($\mu\text{m}/\text{m}$) soratukikerroksessa.

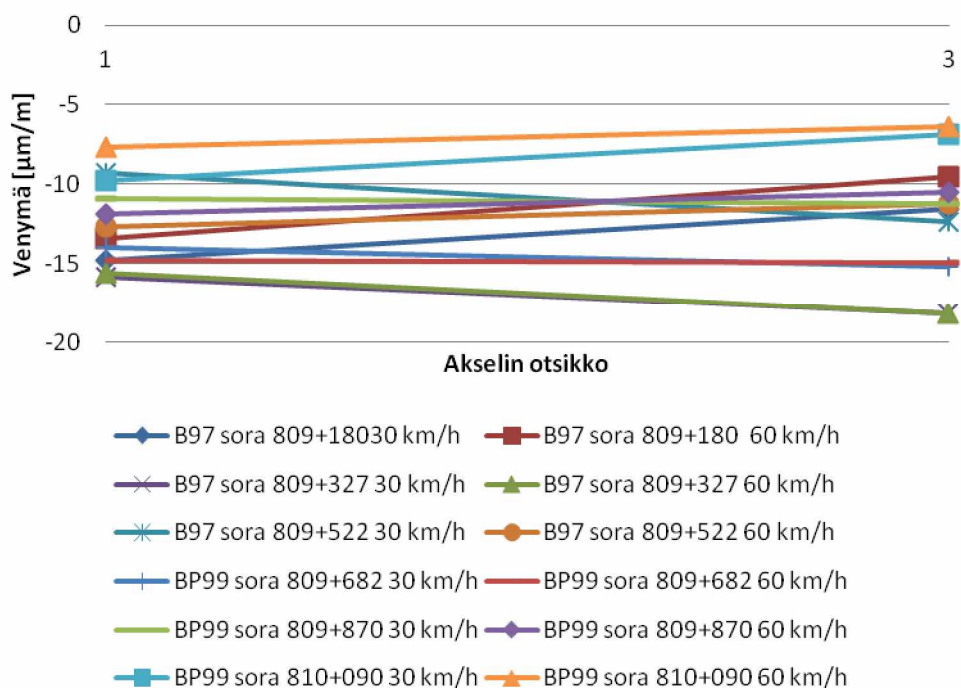
Keskikohta	809+180 B97 sora 30 60 km/h km/h		809+327 B97 sora 30 60 km/h km/h		809+522 B97 sora 30 60 km/h km/h		809+682 BP99 sora 30 60 km/h km/h		809+870 BP99 sora 30 60 km/h km/h		810+090 BP99 sora 30 60 km/h km/h	
Ratapölkky 1	22	21	8	6	42	42	44	42	59	54	56	52
Ratapölkky 2	24	22	-6	-3	41	39	54	51	72	67	51	48
Ratapölkky 3	28	25	10	11	50	46	41	38	72	67	50	46
Keskiarvo	25	23	4	5	44	42	46	44	68	63	52	49
Kiskon vieri												
Ratapölkky 1	-16	-13	-14	-11	4	7	3	3	17	14	-6	-6
Ratapölkky 2	-10	-7	-17	-12	2	3	6	8	22	22	-10	-10
Ratapölkky 3	-7	-5	-9	-8	3	2	-8	-5	20	20	-8	-6
Keskiarvo	-11	-9	-14	-10	3	4	1	2	19	19	-8	-7
Uloke												
Ratapölkky 1	-15	-13	-16	-16	-9	-13	-14	-15	-11	-12	-10	-8
Ratapölkky 3	-12	-10	-18	-18	-12	-11	-15	-15	-11	-11	-7	-6
Keskiarvo	-13	-11	-17	-17	-11	-12	-15	-15	-11	-11	-8	-7



Kuva 3.54 Ratapölkyn keskeltä mitatut venymät.



Kuva 3.55 Kiskon vierestä ratapölkyn keskeltä mitatut venymät.



Kuva 3.56 Ratapölkyn päästä mitatut venymät.

Mitattujen venymien, pölkyn mittauspisteen poikkileikkauksen taivutusvastuksen ja oletetun betonin kimmokertoimen avulla pystytään määrittämään taivutusmomentti. Lisäksi mitattujen venymien suhteiden ja taivutusvastusten suhteiden avulla voidaan määrittää momenttien suhde. Momenttien suhteiden avulla pystytään määrittämään pohjapainejakautuma. Taulukko 3.16 esittää kiskon vieressä pölkyn keskellä ja pölkyn keskellä olevien momenttien suhteet ja taulukko 3.17 esittää ulokkeen ja pölkyn keskiosan olevien momenttien suhteet.

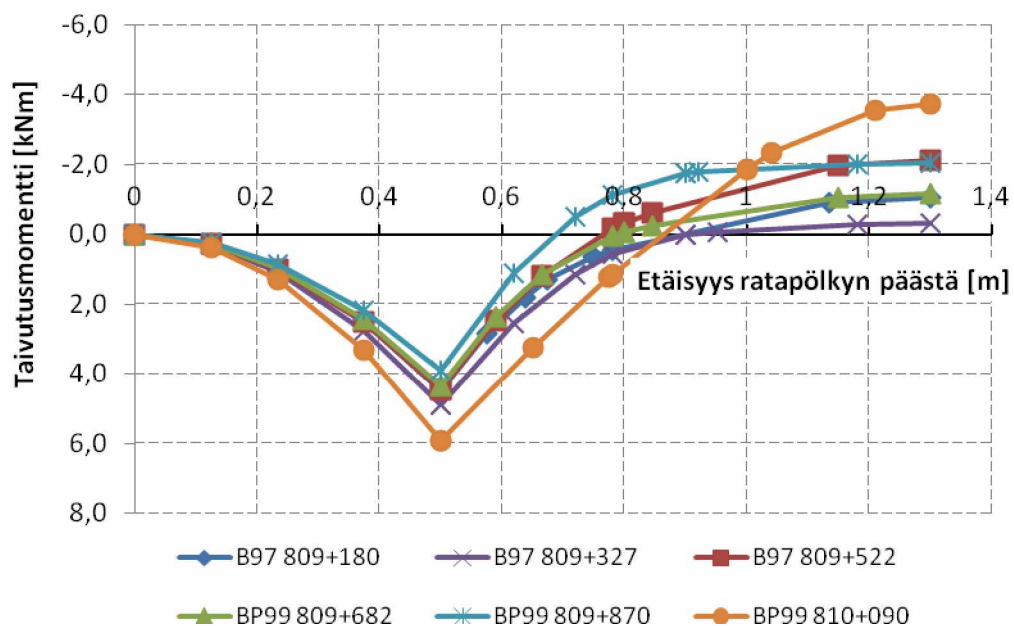
Taulukko 3.16 Mitattu yläpinnan venymien suhde ϵ_k/ϵ_{ke} ja taivutusmomenttien suhde M_k/M_{ke} (kiskon vierä/pölkyn keskikohta) samalla nopeudella tehtyjen ylitysten keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	809+180 B97 sora	809+327 B97 sora	809+522 B97 sora	809+682 BP99 sora	809+870 BP99 sora	810+090 BP99 sora
Ratapölkky 1	-0,68	-1,71	0,13	0,07	0,27	-0,11
Ratapölkky 2	-0,37	3,47	0,06	0,13	0,32	-0,20
Ratapölkky 3	-0,22	-0,83	0,05	-0,16	0,29	-0,14
Keskiarvo						
ϵ_k/ϵ_{ke}	-0,30	1,32	0,06	-0,02	0,30	-0,17
M_k/M_{ke}	-0,44	1,97	0,08	-0,03	0,55	-0,31

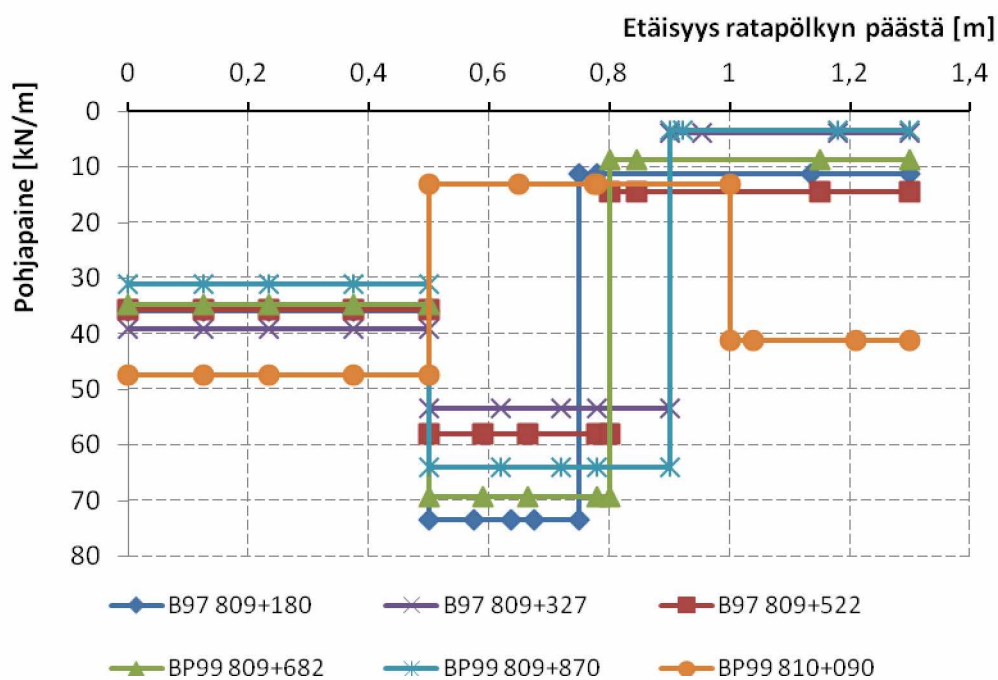
Taulukko 3.17 Mitattu yläpinnan venymien suhde $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttien suhde M_{ul}/M_{ke} (uloke/pölkyn keskikohta) samalla nopeudella tehtyjen ylitysten keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	809+180 B97 sora 30 km/h	809+327 B97 sora 30 km/h	809+522 B97 sora 30 km/h	809+682 BP99 sora 30 km/h	809+870 BP99 sora 30 km/h	810+090 BP99 sora 30 km/h
Ratapölkky 1	-0,65	-2,21	-0,26	-0,33	-0,20	-0,16
Ratapölkky 3	-0,40	-1,79	-0,24	-0,38	-0,16	-0,14
Keskiarvo						
$\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$	-0,52	-2,00	-0,25	-0,36	-0,18	-0,15
M_{ul}/M_{ke}	-0,94	-3,57	-0,46	-0,833	-0,418	-0,350

Kuva 3.57 esittää mitattujen taivutusmomenttien suhteiden mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja kuva 3.58 esittää taivutusmomenttijakautumien mukaiset pohjapainejakautumat. Laskelmat on tehty vakiopyöräkuormalla $P = 42,5$ kN (kiskon kohta), joka on neljäsosa Tka8 akselipainosta.



Kuva 3.57 Mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakaumat.



Kuva 3.58 Mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakaumat.

Kuvaajista voidaan havaita, että pohjapaine oli keskittynyt pölkyn pään alueelle ja pölkyt kantoivat vain vähän keskeltä. Ainoa selkeä poikkeus oli BP99 810+090, jossa pienin pohjapaine oli kiskon vieressä keskellä. Lisäksi pölkyt kantoivat selkeästi eniten keskiosaltaan. Syynä poikkeavaan pohjapainejakaumaan saattaa olla tuennan jälkeinen tukikerroksen poikkeava tiivistyminen.

Betonin venymien lisäksi ratapölkystä mitattiin myös palautuvaa painumaa. Taulukko 3.18 esittää pölkyn päiden palautuvan painuman keskiarvon. Kuten sepelitukikerroksellakin, myös soratukikerroksella pölkyn päiden painumien keskiarvot olivat

hyvin lähellä toisiaan. Myöskään pölkkytyypillä ei ollut suurta merkitystä painuman suuruuteen. Huomionarvoista on, että soratukikerroksella mitatut palautuvat painumat olivat hieman pienempiä verrattuna sepelitukikerroksella mitattuihin pölkkyjen painumiin. Soratukikerroksella suurin yksittäisen pölkyn pään painuma oli hieman alle 0,9 mm kun taas sepelitukikerroksella painuma oli noin 1,7 mm.

Taulukko 3.18 Pölkyn pään palautuvan painuman keskiarvot (mm).

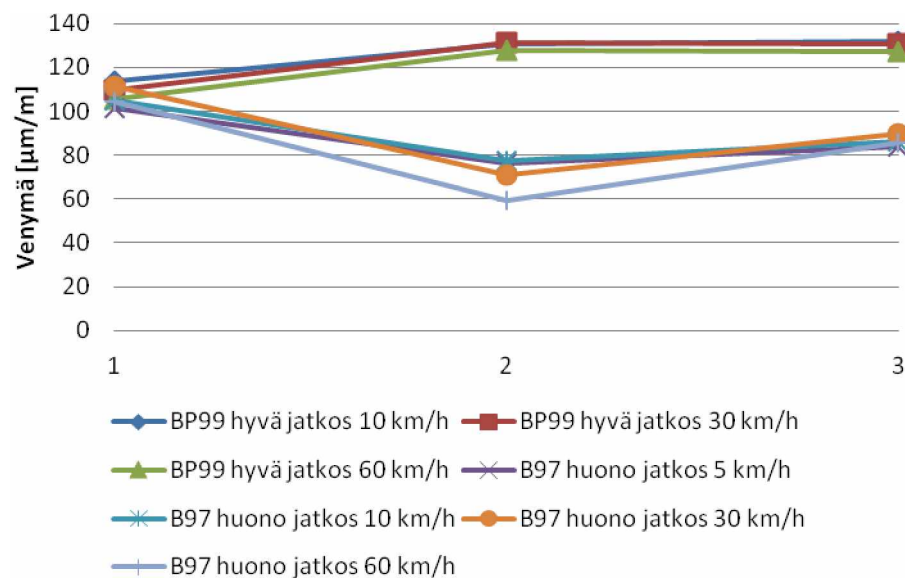
	Bg7 Sora 809+120	Bg7 Sora 809+327	Bg7 Sora 809+522	BP99 Sora 809+682	BP99 Sora 809+870	BP99 Sora 810+090
Painuma	0,50 mm	0,61 mm	0,61 mm	0,45 mm	0,60 mm	0,48 mm

3.3.4 Kiskojaatkokset

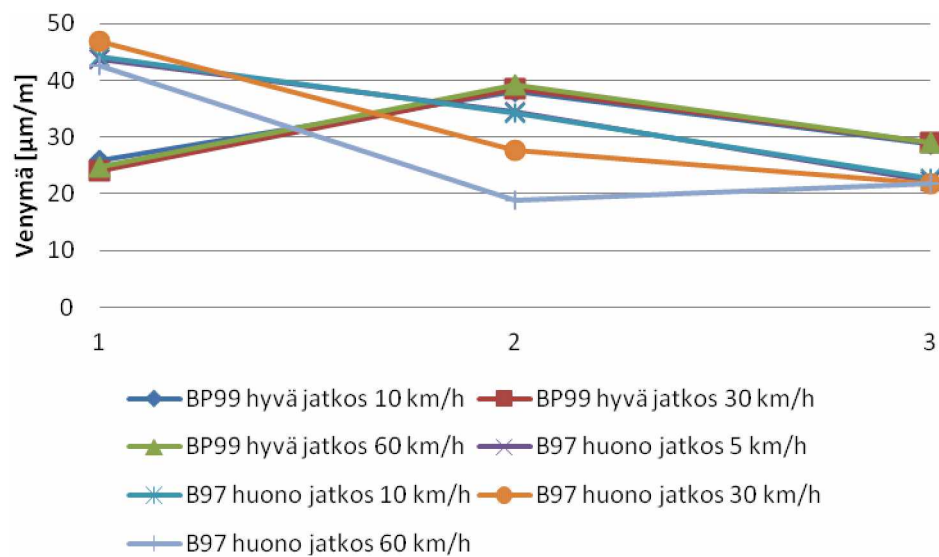
Valtimon koeosuudella tutkittiin kahden jatkoksen kohdalla olleet ratapölkkyt. Toinen jatkoksista oli hyväkuntoinen ja toinen oli huonokuntoinen. Hyväkuntoisen jatkoksen kohdalla tehtiin ylitykset 10, 30 ja 60 km/h nopeudella ja huonokuntoisen jatkoksen kohdalla tehtiin ylitykset 5, 10, 30 ja 60 km/h nopeudella. Jokaisella nopeudella ylitykset tehtiin kaksi kertaa. Taulukko 3.19 esittää eri nopeuksilla mitattujen venymien keskiarvot. Kuva 3.59 esittää pölkyn keskiosasta mitatut venymät, kuva 3.60 kiskon vierestä pölkyn keskeltä mitatut venymät ja kuva 3.61 esittää pölkyn ulokkeen yläpinnasta mitatut venymät.

Taulukko 3.19 Hyvän ja huonokuntoisen jatkoksen kohdalla olleiden pölkkyjen mitattujen venymien keskiarvot.

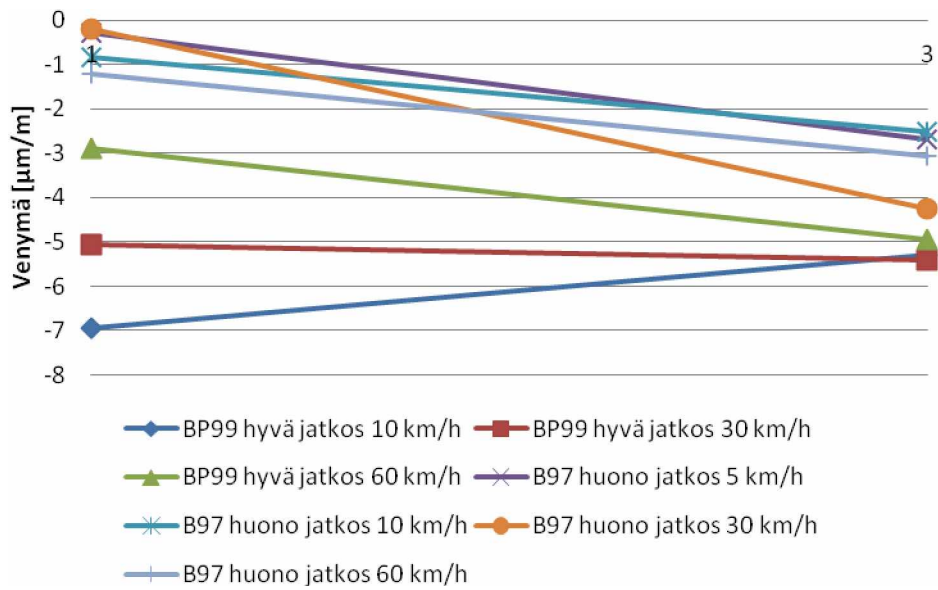
Keskikohta	Hyvä jatkos BP99 sepeli			Huono jatkos Bg7 sepeli			
	10 km/h	30 km/h	60 km/h	5 km/h	10 km/h	30 km/h	60 km/h
Ratapölkky 1	114	110	106	101	105	111	104
Ratapölkky 2	131	131	128	76	77	71	59
Ratapölkky 3	132	131	127	84	86	90	86
Keskiarvo	125	124	120	87	90	91	83
Kiskon vierä							
Ratapölkky 1	26	24	25	44	44	47	43
Ratapölkky 2	38	39	39	34	34	28	19
Ratapölkky 3	29	29	29	22	23	22	22
Keskiarvo	31	31	31	33	34	32	28
Uloke							
Ratapölkky 1	-7	-5	-3	0	-1	0	-1
Ratapölkky 3	-5	-5	-5	-3	-3	-4	-3
Keskiarvo	-6	-5	-4	-2	-2	-2	-2



Kuva 3.59 Ratapölkyn keskeltä mitatut venymät.



Kuva 3.60 Kiskon vierestä mitatut venymät.



Kuva 3.61 Ulokkeen kohdalta mitatut venymät.

Kuvaajista voidaan havaita, että suurimmat pölkyn keskeltä olleet venymät mitattiin silmämääräisesti hyväkuntoiseksi arvioidun jatkoksen kohdalla. Suurimmat venymät olivat noin 130 µm/m.

Mitattujen venymien, pölkyn mittauspisteen poikkileikkauksen taivutusvastuksen ja oletetun betonin kimmokertoimen avulla pystytään määrittämään taivutusmomentti. Lisäksi mitattujen venymien suhteiden ja taivutusvastusten suhteiden avulla voidaan määrittää momenttien suhde. Momenttien suhteiden avulla pystytään määrittämään pohjapainejakauma. Taulukko 3.20 esittää kiskon vieressä pölkyn keskellä ja pölkyn keskellä olevien momenttien suhteet ja taulukko 3.21 esittää ulokkeen ja pölkyn keskiosan olevien momenttien suhteet.

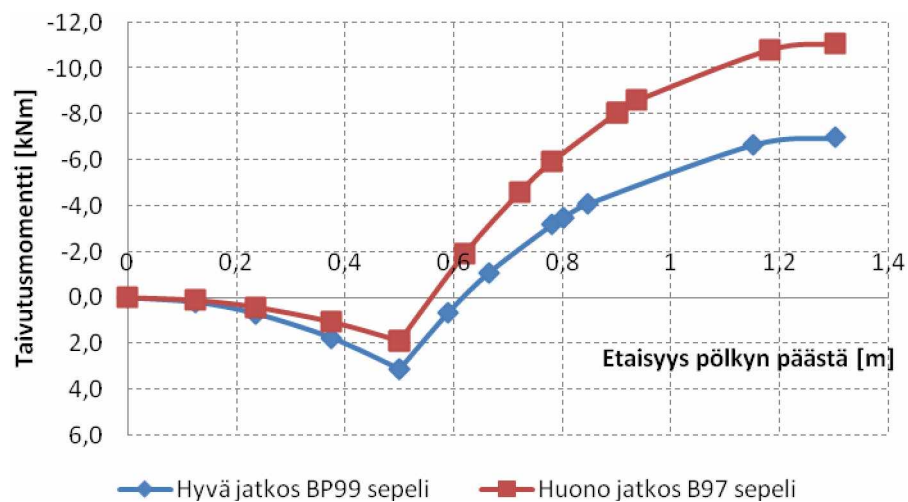
Taulukko 3.20 Kiskon vieressä ja pölkyn keskellä olevien momenttien suhteet.

Venymien ja momenttien suhde	Hyvä jatkos BP99 sepeli	Huono jatkos B97 sepeli
Ratapölkky 1	0,228	0,420
Ratapölkky 2	0,297	0,401
Ratapölkky 3	0,223	0,256
Keskiarvo		
$\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$	0,250	0,359
M_{ki}/M_{ke}	0,457	0,535

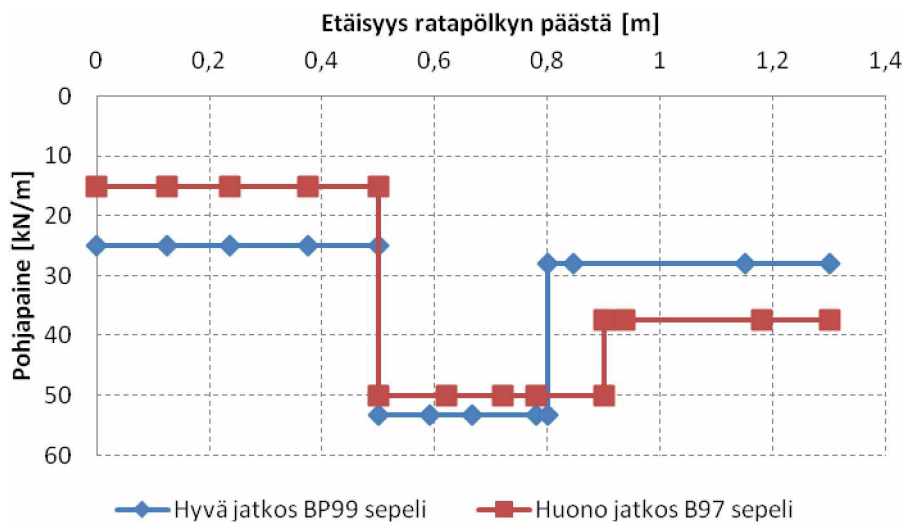
Taulukko 3.21 Ulokkeen kohdalla ja kiskon keskellä olevien momenttien suhteet.

Venymien ja momenttien suhde	Hyvä jatkos BP99 sepeli	Huono jatkos B97 sepeli
Ratapölkky 1	-0,045	-0,006
Ratapölkky 3	-0,040	-0,036
Keskiarvo		
$\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$	-0,043	-0,021
M_{ul}/M_{ke}	-0,099	-0,038

Kuva 3.62 esittää mitattujen taivutusmomenttien suhteiden mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja Kuva 3.63 Mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakaumat. esittää taivutusmomenttijakautumien mukaiset pohjapainejakautumat. Laskelmat on tehty vakiopyöräkuormalla $P = 42,5 \text{ kN}$ (kiskon kohta), joka on neljäsosa T_{ka8} akselipainosta.



Kuva 3.62 Mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakaumat.



Kuva 3.63 Mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakaumat.

Kuvaajista voidaan havaita, että hyvän ja huonokuntoisen kiskoatkoksen kohdalla olevissa pölkkyissä pohjapainejakaumat olivat melko lähellä toisiaan. Molemmissa tapauksissa suurin pohjapaine oli kiskon vieressä pölkyn keskellä. Venymien perusteella pölkyn keskiosalle määritetty momentti oli suurempi hyväkuntoisen jatkoksen kohdalla. Pölkyn keskiosaan kohdistuva taivutusmomentti oli kuitenkin suurempi huonokuntoisen jatkoksen kohdalla kun momentit määritettiin pohjapainejakauman ja oletetun pölkyn päähän kohdistuvan kuorman ($P=42,5$ kN) avulla. Eroavuus venymien mukaan määritettyyn momenttiin voi kuitenkin selittyä osittain sillä, että kuormat eivät ole jakautuneet peräkkäisten pölkkyjen kesken oletetulla tavalla.

3.3.5 Yhteenveto

Mittauksia tehtiin sekä sora-, että sepelitukikerroksella. Sepelitukikerroksessa pölkyn keskiosassa olleet venymien avulla määritetyt momentit olivat hieman suurempia B97-pölkkyllä verrattuna BP99-pölkkyyn (taulukko 3.22). Tilanne oli kuitenkin päinvastainen soratukikerroksella, sillä soratukikerroksessa BP99-pölkkyjen keskellä olleet momentit olivat hieman suurempia verrattuna B97-pölkkyjen momentteihin. Yllättävintä mittauksissa oli kuitenkin se, että soratukikerros tarjosi sepelitukikerrosta paremman tuennan. Soratukikerroksessa pohjapaine oli keskittynyt pölkyn päiden alueelle ja pölkkyt kantoivat keskiosaltaan vain vähän. Palautuvien painumien perusteella soratukikerros oli hieman sepelitukikerrosta jäykempi.

Yhtenä betoniratapölkyn heikkoutena soratukikerroksessa pidetään pölkyn painumista ja sitä kautta tuennan keskittymistä pölkyn keskiosaan. Tehtyjen mittausten perusteella tätä ei kuitenkaan havaittu. Pölkkyyn kohdistuvien rasitusten osalta soratukikerros oli vähintäänkin yhtä hyvä kuin sepelöity tukikerros. Pölkyn rasitusten kannalta pölkkytyypillä ei näyttänyt olevan suurtakaan merkitystä niin soratukikerroksella kuin osittain sepelöidyllä tukikerroksella.

Ratapölkyn keskikohdan taivutusmomentti on laskettu venymän ϵ_{ke} , taivutusvastuksen W_{ke} ja oletetun betonin kimmokertoimen $E_c = 37000$ MPa avulla lausekkeella $M = \epsilon_{ke} \cdot E_c \cdot W_{ke}$. Kiskon kohdan momentti on saatu laskemalla ensin edellä mainitulla tavalla ulokkeen taivutusmomentti kohdassa 0,235 m ratapölkyn päästä ja kertomalla saa-

tu tulos etäisyyksien neliöiden suhteella $(0,5\text{m}/0,235\text{ m})^2 = 4,53$. Laskenta perustuu oletukseen tasaisesta pohjapaineesta ulokkeen alapinnalla.

Taulukko 3.22 Ratapölkkyjen venymien perusteella määritetyt taivutusrasitukset (kNm) koeosuudella.

Ratapölkyn keskikohta	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
BP99 sepeli	-2,6	-2,1	-3,3	0,4
Bg7 sepeli	-3,4	-2,1	-4,8	0,9
BP99 sora	-1,6	-1,2	-2,2	0,3
Bg7 sora	-0,9	0,2	-1,9	0,6

Taivutusmomentti on laskettu venymän ε_{ke} , taivutusvastuksen W_{ke} ja oletetun betonin kimmokertoimen $E_c = 37000\text{MPa}$ avulla lausekkeella $M = \varepsilon_{ke} \cdot E_c \cdot W_{ke}$.

Taulukko 3.23 Ratapölkkyjen venymien perusteella määritetyt kiskon kohdan taivutusrasitukset (kNm) koeosuudella.

Ratapölkyn kiskon kohta	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
BP99 sepeli	2,3	3,8	0,5	1,3
Bg7 sepeli	1,5	2,7	0,6	0,7
BP99 sora	3,6	4,9	2,0	1,0
Bg7 sora	4,1	5,5	2,8	0,9

Kiskon kohdan momentti on saatu laskemalla ensin edellä mainitulla tavalla ulokkeen taivutusmomentti kohdassa 0,235 m ratapölkyn päästä ja kertomalla saatu tulos etäisyyksien neliöiden suhteella $(0,5\text{m}/0,235\text{ m})^2 = 4,53$. Laskenta perustuu oletukseen tasaisesta pohjapaineesta ulokkeen alapinnalla.

Hyvä ja huonokuntoisen jatkoksen kohdalla olleiden pölkkyjen pohjapainejakaumat olivat suhteellisen samanlaiset. Molemmissa kohteissa suurin pohjapaine oli kiskon vieressä pölkyn keskellä, mutta huonon jatkoksen Bg7 pölkkyt kantoivat keskiosaltaan hieman hyvän jatkoksen BP99 pölkkyjä enemmän. Saatujen mittaustulosten perusteella ei voida kuitenkaan selvästi sanoa sitä, että huonokuntoisen jatkoksen kohdalla olleet pölkkyt olisivat rasitetumpia kuin hyvän jatkoksen kohdalla olleet pölkkyt.

3.4 Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen rasiusten mittaus

3.4.1 Koekohteet, koeohjelma ja mittausten aikaiset havainnot

3.4.1.1 Yleiskuvaus

Betoniratapölkkyyn kohdistuviin rasituksiin vaikuttaa merkittävästi pölkyn pohjapainejakautuma, mikä vaihtelee mm. vuodenajan ja tukikerroksen kunnon vaikutuksesta. Muun muassa RATO 11:ssä esitetyn oletuksen mukaisesti pohjapaineen tulisi jakautua noin 1000 mm matkalle ratapölkyn molempiin päihin. Todellisuudessa radassa vallitseva tilanne on kuitenkin harvoin tällainen ja ratapölkky kantaakin osittain myös keskeltä. Radassa vallitsevien pohjapainejakautumien arvioimiseksi Tampereen teknillinen yliopisto teki betoniratapölkkyjen venymämittauksia kenttämittauskohteilla eri puolilla Suomea. Mittaukset tehtiin vuosina 2011-2012. Pohjoisimmat kohteet olivat hieman Oulun eteläpuolella ja kohteista eteläisin sijaitti

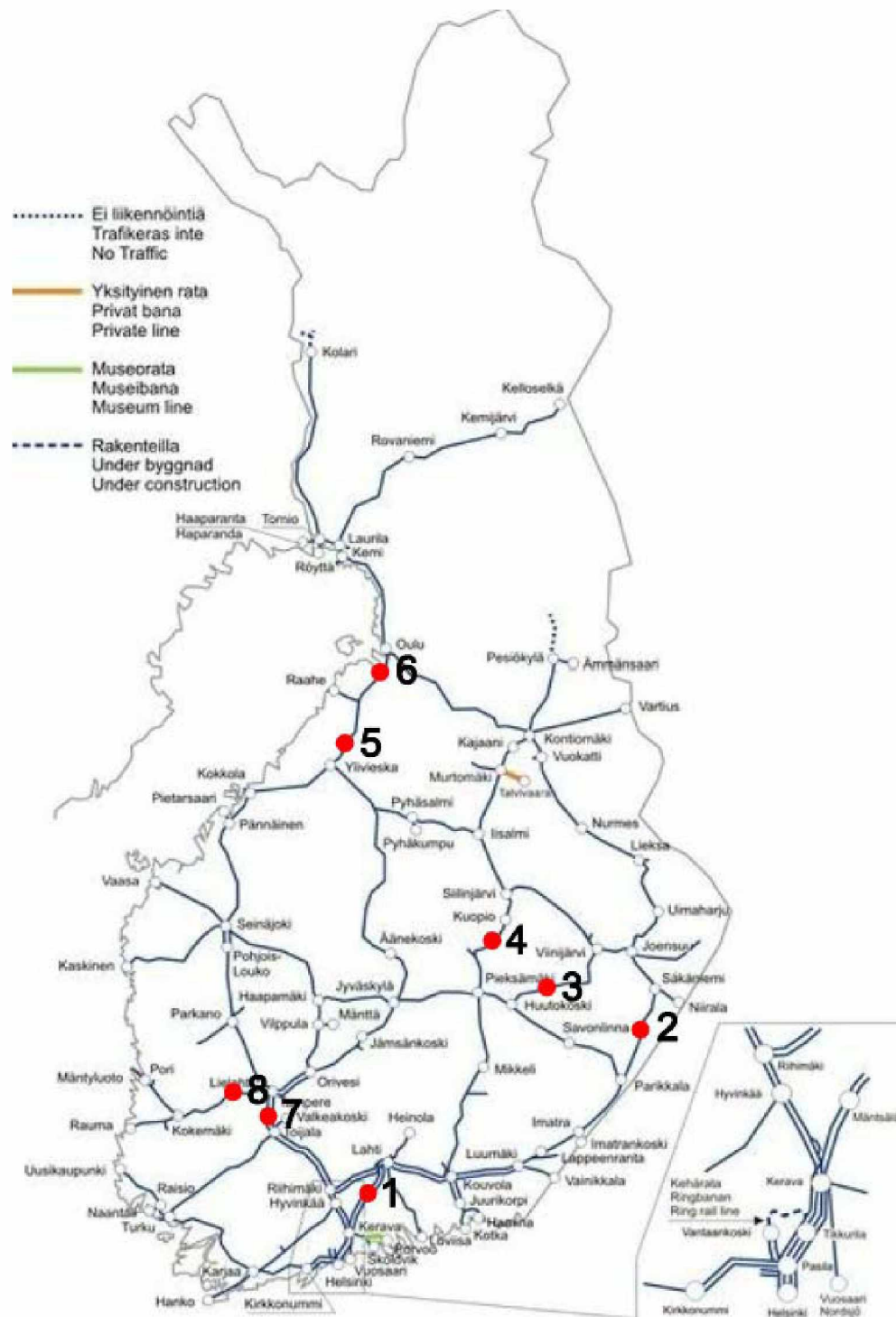
Kerava–Lahti-oikoradalla. Mittausten tarkoituksena oli arvioida ratapölkkyihin kohdistuvia rasituksia ja tätä kautta pohjapainejakautumia eri rataosuuksilla eri vuodenaikoina.

Mittasajankohdiksi valittiin kolme eri vuodenaikaa, jolloin jokaisessa kohteessa käytiin tekemässä mittaukset. Ensimmäisenä mittausajankohtana oli kevät, jolloin roudan sulamisesta johtuen ratapenkereen jäykkyys on pienimmillään. Toiset mittaukset tehtiin loppukesästä, jolloin ratapenkereen jäykkyys voitiin olettaa normaaliksi ja kolmannet mittaukset tehtiin talvella, kun ratapenger oli routaantunut. Talvella ratapenkereen jäykkyys on suurimmillaan (Peltokangas et al. 2013).

Mittauskohteista seitsemän sijaitsi TTY:n routaserantapisteissä tai välittömästi niiden läheisyydessä. Lisäksi yhdeksi mittauskohteeksi valittiin liikennepaikkavälillä Kangas-Oulainen oleva kohde. Kohde sijaitsi rataosalla, missä on havaittu useita yläpinnasta haljenneita ratapölkkyjä. Betoniratapölkkyt on asennettu kyseiselle alueelle vuonna 2004 ja halkeamat ovat syntyneet pölkkyihin pian asentamisen jälkeen. Taulukossa 3.24 on esitetty mittauskohteet ja niiden kilometrilukemat. Lisäksi kuvassa 3.64 on esitetty kartta, johon on merkitty mittauskohteet karkealla tarkkuudella. Peltokangas et al. (2013) esittelevät kohteita tarkemmin.

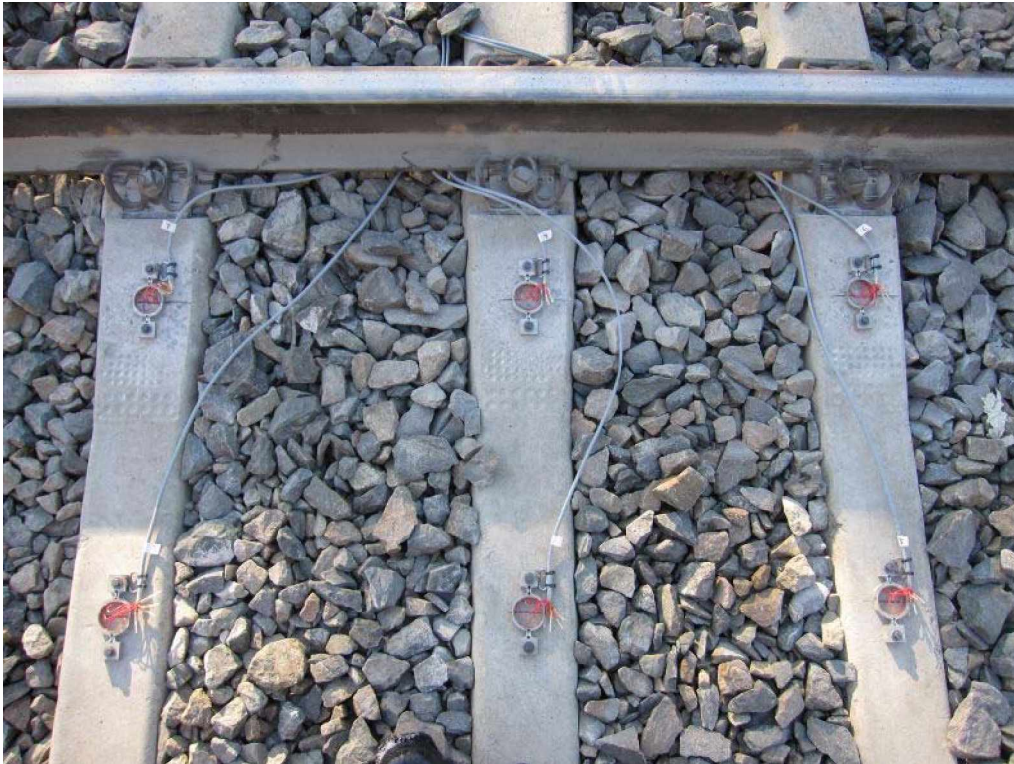
Taulukko 3.24 Mittauskohteet, rataosa, liikennepaikkaväli ja kilometrilukema.

Kohde	Rataosa	Liikennepaikkaväli	km-lukema
1	Kerava-Hakosilta (Kev-Hlt)	Mäntsälä-Sipilä (Mlä-Sip)	65+079
2	Kouvola-Joensuu (Kvl-Joe)	Kesälahti-Puhos (Kti-Pus)	441+725
3	Pieksämäki-Joensuu (Pie-Joe)	Varkaus-Heinävesi (Var-Hnv)	445+300
4	Pieksämäki-Kontiomäki (Pie-Kon)	Airaksela-Kurkimäki (Arl-Krm)	442+260
5	Seinäjoki-Oulu (Sei-Oul)	Kangas-Oulainen (Kgs-Ou)	648+200
6	Seinäjoki-Oulu (Sei-Oul)	Liminka-Kempele (Lka-Kml)	732+527
7	Riihimäki-Tampere (Rii-Tre)	Viiala-Mattila (Via-Mat)	156+291
8	Lielähti-Kokemäki (Llh-Kki)	Karkku-Suoniemi (Kru-Snm)	225+266



Kuva 3.64 Edellisessä taulukossa esitellyt mittauskohteet.

Mittauksiin käytettiin TTY:llä kehitettyjä kohdan 2.1.3.1 mukaisia venymäsilmuksia. Venymäsilmut kiinnitettiin ratapölkkyihin pulteilla kuvan 3.65 mukaisesti. Kevään kenttämittauskierroksella käytettiin kuutta anturia, jotka oli sijoitettu kolmeen peräkkäiseen ratapölkkyyn. Kolme anturia sijaitsi ratapölkyn keskellä ja kolme kiskon vieressä.



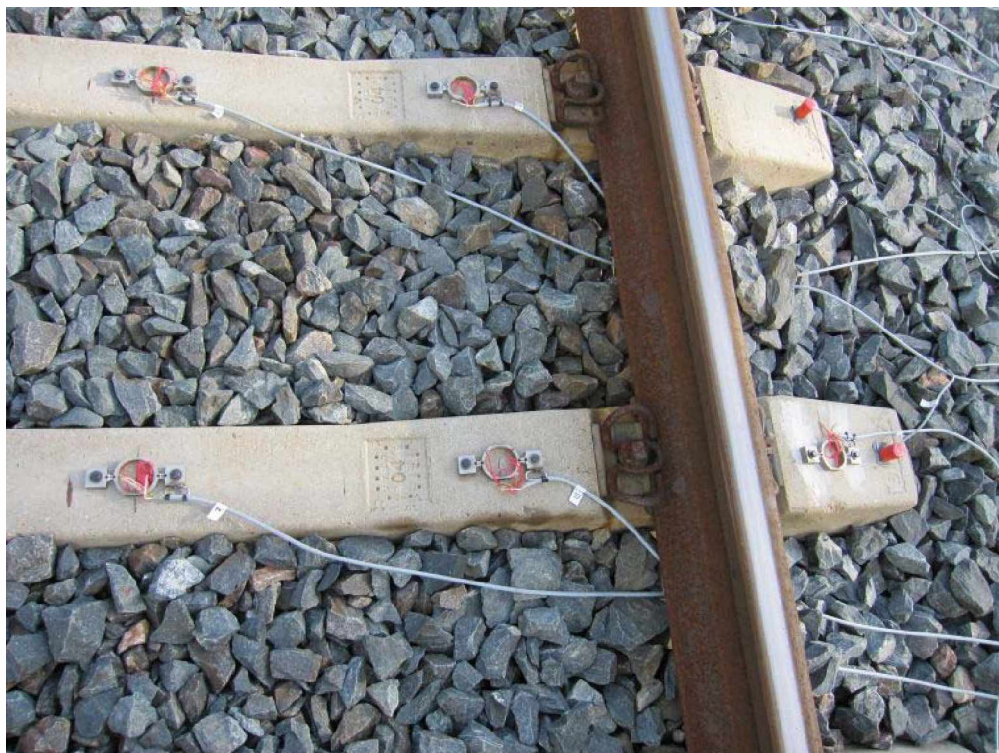
Kuva 3.65 Mittausjärjestely rataosuudella Airaksela-Kurkimäki huhtikuussa 2011.

Kolmen peräkkäisen ratapölkyn venymä mitattiin pölkyn yläpinnalla keskellä ja 500 mm päässä keskeltä. Kohteessa Kesälahti-Puhos anturiväli oli 505 mm (ensimmäinen pölkky) ja 510 mm (muut). Viialassa venymät mitattiin kiskojen välissä keskikohdan lisäksi etäisyydellä 520 mm kiskosta kuvan 3.66 mukaisesti.

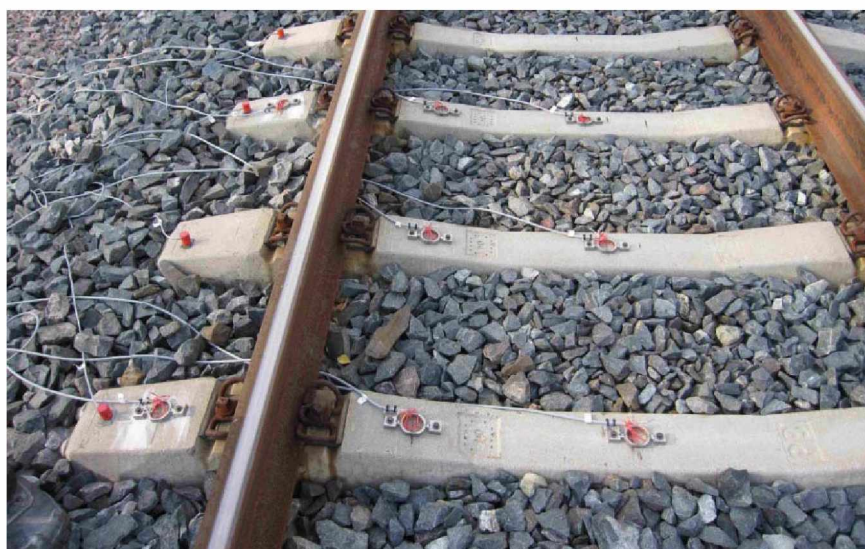


Kuva 3.66 Mittausjärjestely Viialassa huhtikuussa 2011. Jatkuva mittaus.

Kesän ja talven mittauskierroksilla käytettiin kahdeksaa anturia, joista kuusi oli sijoitettu samoihin kohtiin kuin kevään mittauksissa. Näiden kuuden anturin lisäksi kahden ratapölkyn päihin sijoitettiin anturit, ja syyskuusta 2011 alkaen mitattiin venymä myös ensimmäisen ja kolmannen ratapölkyn ulokkeen yläpinnalla etäisyydellä 265 mm kiskon jalan keskipisteestä kuvien 3.67 ja 3.68 mukaisesti. Pölkyn päihin sijoitettujen anturien avulla pyrittiin varmentamaan kiskojen välissä olevien anturien venymätulosten perusteella määritettyä pohjapainejakautumaa.



Kuva 3.67 Mittauksissa käytettyjä venymäsilmoitinta kiinnitettynä ratapölkkyihin oikoradalla.



Kuva 3.68 Venymäantureiden sijainnit syyskuussa 2011 (rataosuus Mäntsälä-Sipilä).

Rataosuudella Kangas-Oulainen havaittiin viimeisessä mitatussa ratapölkkyssä halkeamia yläpinnassa. Myös muissa läheisissä ratapölkkyissä havaittiin silmämääräisesti halkeamia.

3.4.1.2 Laskentaperiaate

Tavoitteena oli etsiä pölkyn alapintaan sellainen pohjapainejakautuma, joka toteuttaisi venymämittausten mukaisen venymän kussakin mittauskohdassa samanaikaisesti. Laskenta tehtiin kuvitteelliselle pyöräkuormalle, koska laskennassa merkitystä

oli lähinnä pölkyn keskiosan yläpinnan ja kiskon viereisen kohdan yläpinnan venymien suhteella, ei absoluuttisilla taivutusmomenttiarvoilla. Laskenta tehtiin Excel-tilukossa siten, että iterointi oli mahdollista etsimällä kyseiseen tapaukseen soveltuvat tukireaktiot eri kohtiin ratapölkyn alapuolelle.

Taivutusvastusten suhde pitää huomioida venymävertailussa, koska ratapölkkyjen muodon merkitys tiettyä pohjapaine- ja taivutusmomenttijakautumaa vastaavaan yläpinnan venymään on suuri. Tarkasteltavat ratapölkkyt oletetaan taivutusvastuslaskelmissa (taulukko 3.25) halkeilemattomiksi. Ratapölkkyjen B97 muoto on riittävän lähellä pölkyn BP89 muotoa, joten molemmille pölkkytyypeille käytetään samaa suhteen W_{ki}/W_{ke} arvoa ja vain hieman eroavaa suhteen W_{ul}/W_{ke} arvoa.

Taulukko 3.25 Tarkasteltavien pölkkytyyppien taivutusvastukset [mm³] halkeamattomana.

Taivutusvastus $W_{yläpinta}$	BP99 ja BP89	B97	B75
keskikohta, W_{ke}	1006000	1006000	826000
kiskon vieressä olevan anturin kohdalla, W_{ki}	1500000	1500000	983000
ulokeanturin kohdalla, W_{ul}	1911000	1800000	1404000
suhde W_{ki}/W_{ke}	1,491	1,491	1,19
suhde W_{ul}/W_{ke}	1,90	1,79	1,70

Taivutusmomenttien laskenta mittaustuloksista perustuu poikkileikkauksen reunajännityksen laskentausekseen $\sigma = M/W$. Toisaalta jännitys kimmoisalla materiaalilla on kimmokerroimen ja venymän tulo eli $\sigma = E \cdot \epsilon$. Tästä saadaan venymä $\epsilon = M/(W \cdot E)$. Kun kimmokerroin tutkittavassa ratapölkkyssä on vakio (esim. $E_c = 37000$ MPa eurokoodin mukaan betonille K60), saadaan yhteys taivutusmomenttivertailua varten: mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ki}/M_{ke} = \epsilon_{ki}/\epsilon_{ke} \cdot W_{ki}/W_{ke}$.

3.4.2 Mittaustulokset, huhtikuu 2011

3.4.2.1 Mittauskohteet

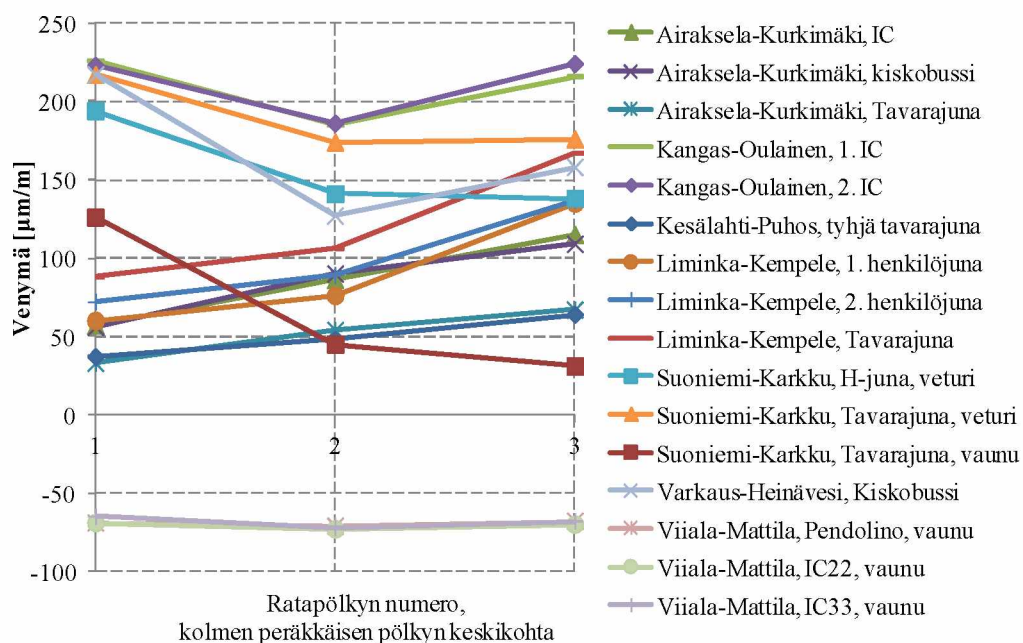
Mittaukset toteutettiin taulukossa 3.26 esitettyjen junien ylitysten aikana. Venymämittaustuloksista poimittiin junakohtaisesti pääasiassa tyypillinen yhden vaunun yhden pyöräkerran aikainen venymämuutos.

Taulukko 3.26 Tarkasteltavat rataosuudet, mittauspäivät, pölkkytyypit ja pölkkyjä kuormittaneet junat.

Airakse- la- Kurkimä- ki	Kangas- Oulai- nen	Kesälah- ti-Puhos	Liminka- Kempele	Mäntsä- lä-Sipilä	Suo- niemi- Karkku	Varkaus- Heinä- vesi	Viiala- Mattila
13.4.2011	14.4.2011	12.4.2011	14.4.2011	11.4.2011	6.4.2011	12.4.2011	6.4.2011
B97 -02	B97 -03	B97	BP99	BP99 - 04	B75	B97 -02	BP89
IC	IC	tavara- juna (tyhjä)	henkilö- juna	kisko- bussi	henkilö- juna, veturi	kisko- bussi	Pendoli- no, vaunu
kisko- bussi	IC		henkilö- juna	Allegro	Tavara- juna, veturi		IC22, vaunu
tavaraju- na			tavara- juna	radan- tark. vaunu EMMA	Tavara- juna, vaunu		IC33, vaunu
				IC			

3.4.2.2 Mitatut venymät

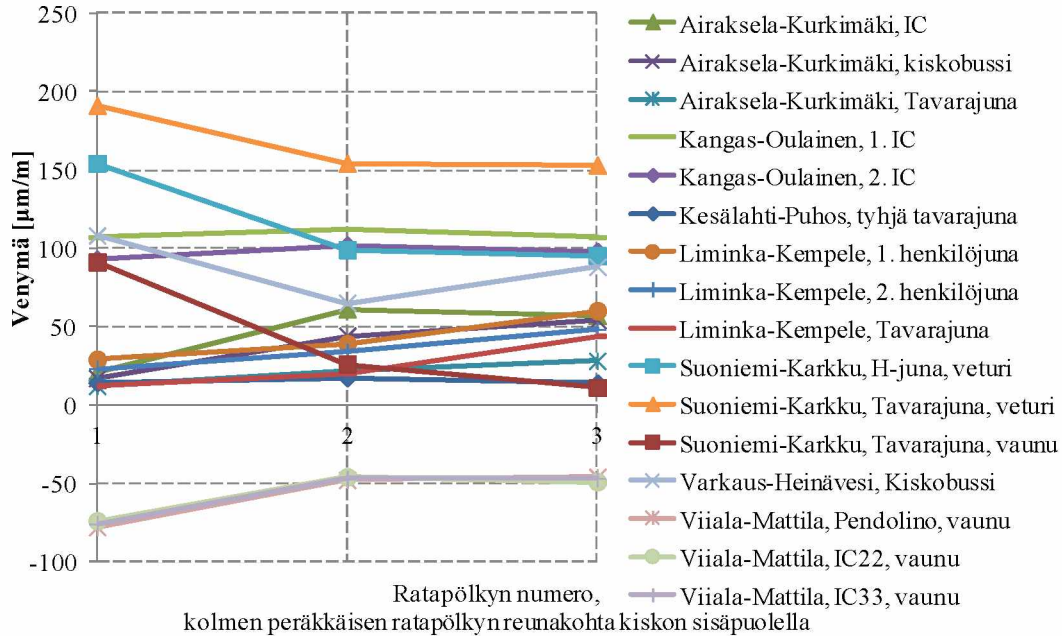
Kuvassa 3.69 on esitetty mitatut venymät ratapölkyn yläpinnalla keskellä ja kuvassa 3.70 reunalla 500-510 mm päässä keskikohdalta.



Kuva 3.69 Mitatut venymät ϵ_{ke} ratapölkyn keskellä yläpinnassa.

Venymän keskiarvoa $117\mu\text{m}/\text{m}$ vastaava taivutusmomentti voidaan laskea ratapölkyn keskikohdan taivutusvastuksen $W_{ke} = 1006000\text{mm}^3$ ja oletetun betonin kimmo-
kertoimen $E_c = 37000\text{MPa}$ avulla: $M_{ke,keskiarvo} = \epsilon_{ke} \cdot E_c \cdot W_{ke} =$

$117\mu\text{m}/\text{m} \cdot 37000\text{N}/\text{mm}^2 \cdot 1006000\text{mm}^3 = 4,4 \text{ kNm}$.



Kuva 3.70 Mitatut venymät ϵ_{ki} yläpinnassa reunalla kiskoja välissä.

Kuvaajien mukaan Viialassa mitatut venymät olivat ratapölkkyissä kaikkien kolmen junan ylityksen aikana hyvin samanlaiset. Kaikki venymät olivat miinusmerkkisiä, joten Viialassa mitattiin betonin puristumia ja jännitykset yläpinnalla olivat puristusjännityksiä.

Karkussa kahden viimeisimmän ratapölkyn mittaustulokset olivat keskenään melko samanlaiset kaikkien pyöräkertojen kohdalla, mutta ensimmäinen ratapölkky oli selvästi rasitetumpi kuin kaksi muuta. Tavarajunan veturi oli selvästi painavampi kuin vaunu. Henkilöjunan pyöräkerran alla pölkyn yläpinnan venymät olivat lähes tavarajunan veturin venymämittausten suuruiset.

Rataosuudella Mäntsälä-Sipilä kahdessa jälkimmäisessä ratapölkkyssä sijainneet venymäanturit eivät toimineet, joten venymä mitattiin neljän peräkkäisen junan ylityksen aikana vain ensimmäisestä ratapölkystä. Venymämittaustulokset esitetään taulukossa 3.27 ja venymien keskinäisiä suhteita kuvassa 3.71.

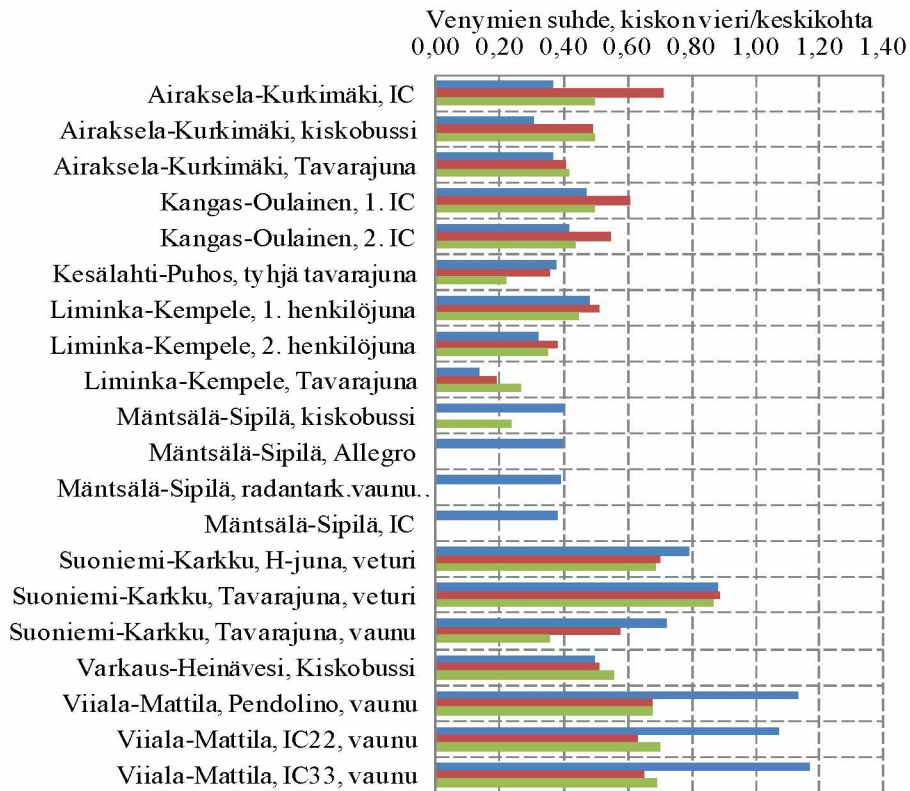
Taulukko 3.27 Mitatut venymät $\Delta\epsilon$ ratapölkyn yläpinnalla, peräkkäisten mittausten (junien) keskiarvo, $\mu\text{m}/\text{m}$.

Keskikohta	Airak-sela-Kurki-mäki	Kan-gas-Oulai-nen	Kesä-lahti-Puhos	Limin-min-ka-Kem-pele	Mänt-sälä-Sipilä	Suo-nie-mi-Kark-ku	Varka-us-Heinä-vesi	Viiiala-Mattila
Ratapölkky 1	49	225	37	73	76	179	217	-68
Ratapölkky 2	77	186	48	90	-	120	127	-72
Ratapölkky 3	97	220	64	146	-	115	158	-69
Keskiarvo	74	210	50	103	76	138	167	-69
Kiskon vieri								
Ratapölkky 1	17	100	14	21	30	145	108	-76
Ratapölkky 2	42	107	17	31	-	93	65	-47
Ratapölkky 3	46	103	14	51	-	86	88	-47
Keskiarvo	35	103	15	34	30	108	87	-57

Mitatut jännitykset laskettiin lausekkeella $\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_{c,\text{mitattu}} = 37000\text{MPa} \cdot \epsilon_{c,\text{mitattu}}$. Suurimmat jännitykset olivat siis ratapölkyn keskikohdalla, vetojännitys tässä positiivinen ja puristusjännitys negatiivinen luku.

3.4.2.3 Tulosten analysointi

Kuvassa 3.71 esitettävä mitattujen venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$ vastasi mitattua jännitysmuutosten suhdetta, koska jännitysmuutosten suhde oli pieni.



Kuva 3.71 Venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$

Mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ki}/M_{ke} = \epsilon_{ki}/\epsilon_{ke} \cdot W_{ki}/W_{ke}$ esitetään taulukossa 3.28.

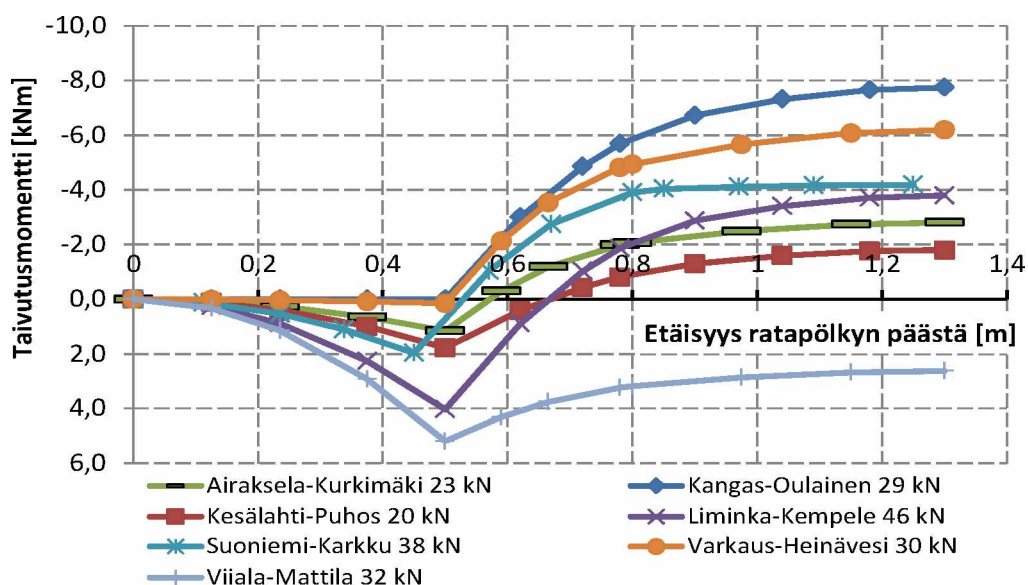
Taulukko 3.28 Mitattu venymien suhde, $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$ (kiskon vieri / pölkyn keskikohta) yläpin-
nalla, peräkkäisten mittausten (junien) keskiarvo.

Venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$	Airaksela-Kurkimäki	Kangas-Oulainen	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiala-Mattila
Ratapölkky 1	0,34	0,45	0,38	0,29	0,39	0,81	0,50	1,12
Ratapölkky 2	0,55	0,58	0,35	0,34	-	0,78	0,51	0,65
Ratapölkky 3	0,48	0,47	0,22	0,35	-	0,75	0,56	0,69
Keskiarvo	0,46	0,50	0,32	0,33	0,39	0,78	0,52	0,82
W_{ki}/W_{ke}	1,491	1,491	1,491	1,491	1,491	1,19	1,491	1,491
M_{ki}/M_{ke}	0,68	0,74	0,47	0,49	0,59	0,93	0,78	1,23

Mittausten mukaiset taivutusmomentti- ja pohjapainejakautumat

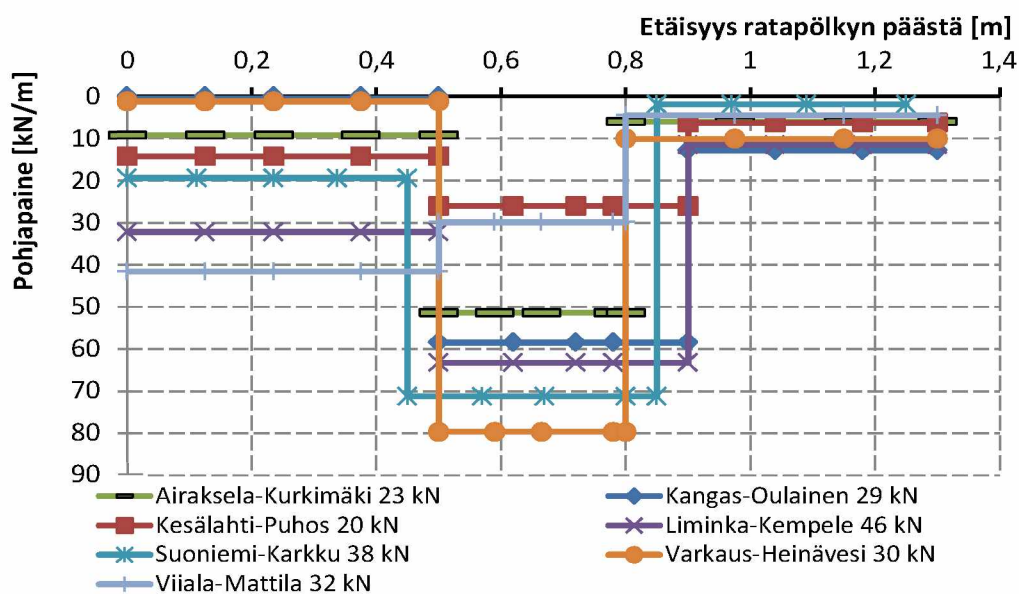
Mitattujen taivutusmomenttien suhteiden M_{ki}/M_{ke} mukaiset taivutusmomenttijakautumat esitetään kuvassa 3.72 ja pohjapainejakautumat kuvassa 3.73. Momenttikuvajien muoto etsittiin iteroimalla mitatun taivutusmomenttisuhteen mukaiseksi ensin vakiopyöräkuormalla $P = 100$ kN (yhden ratapölkyn kiskon kohta). Sen jälkeen pyöräkuorma pienennettiin vastaamaan mitattuja absoluuttisia taivutusmomentteja M_{ki} ja M_{ke} , jotka oli laskettu mitatuista venymistä kaavalla $M = \epsilon \cdot E_c \cdot W$. Koska näissä kevään 2011 mittauksissa venymämuutos ϵ mitattiin vain kahdessa kohdassa (0,8 m ja 1,3 m ratapölkyn päästä) ratapölkkyä kohden, hyödynnettiin lisätietona kahden seuraavan

vuodenajan mittaustuloksia ja niiden mukaisia pyöräkuormia. Kevään 2011 taivutusmomentti- ja pohjapaine kuvaajat sisältävät siis hieman enemmän epävarmuustekijöitä kuin kahden seuraavan vuodenajan kuvaajat.



Kuva 3.72 Huhtikuussa 2011 mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja arvio yhteen pölkkyyn kohdistuneesta pyöräkuormasta.

Rataosuuden Viiala-Mattila pohjapainejakauma poikkeaa selvästi muiden rataosuuksien jakautumista. Suuri ulokkeen alapuolinen tuenta ja pieni tuenta raiteen keskellä johtavat muihin verrattuna erimerkkiseen taivutusmomenttiin raiteen keskellä.



Kuva 3.73 Huhtikuussa 2011 mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakautumat ja pyöräkuormat.

3.4.3 Mittaustulokset, syyskuu 2011

3.4.3.1 Mittauskohteet ja mittausten aikaiset havainnot

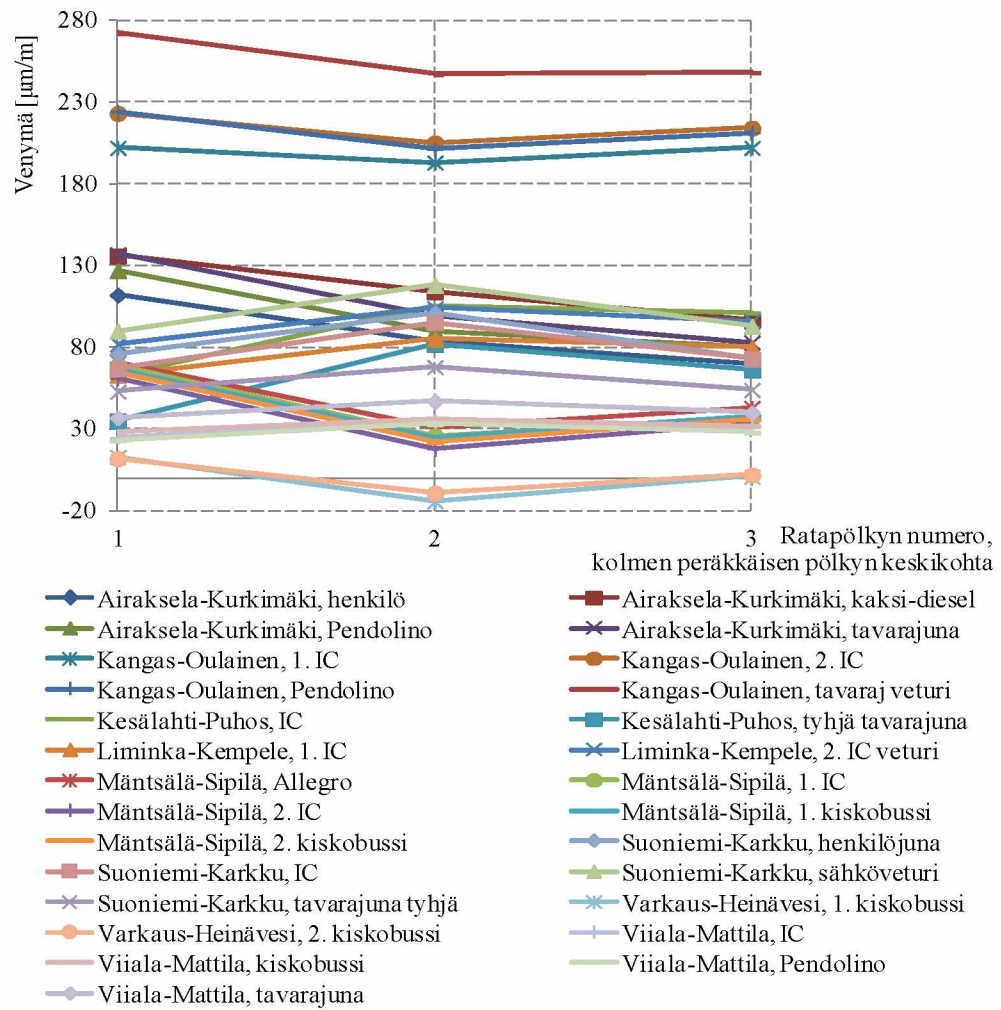
Mittaukset toteutettiin taulukossa 3.26 esitettyjen junien ylitysten aikana.

Taulukko 3.29 Tarkasteltavat rataosuudet, mittauspäivät, pölkkytyypit ja pölkkyjä kuormittaneet junat.

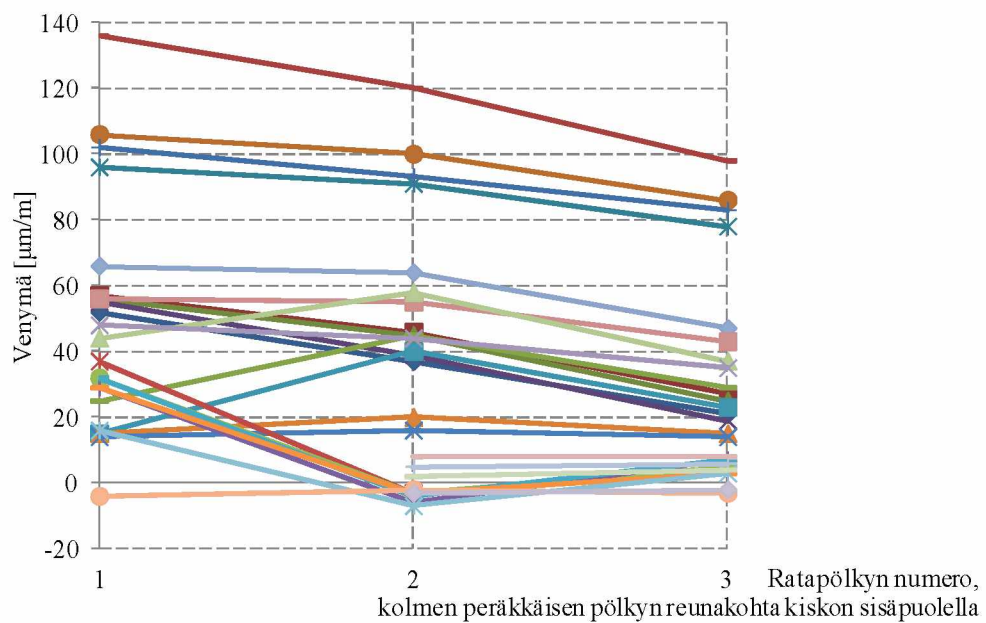
Airakse- la- Kurki- mäki	Kangas- Oulainen	Kesälah- ti-Puhos	Liminka- Kempele	Mäntsä- lä-Sipilä	Suonie- mi- Karkku	Varkaus- Heinäve- si	Viiala- Mattila
14.9.2011	14.9.2011	13.9.2011	15.9.2011	12.9.2011	29.9.2011	13.9.2011	29.9.2011
B97 -02	B97 -03	B97	BP99	BP99 – 04	B75	B97 -02	BP89
henkilö- juna	IC	IC	IC	Allegro	henkilö- juna	kisko- bussi	IC
kaksi diesel- veturia	IC	tavara- juna (tyhjä, kaksi diesel- veturia)	IC (veturi mitattu)	IC	IC	kisko- bussi	kisko- bussi
Pendoli- no	Pendoli- no			IC	sähkö- veturi (pelkkä)		Pendoli- no
tavara- juna (tukki- kuorma, kaksi diesel- veturia)	tavara- juna (kaksi diesel- veturia)			kisko- bussi	tavara- juna (tyhjä, sähkö- veturi)		tavara- juna
				kisko- bussi			

3.4.3.2 Mitatut venymät

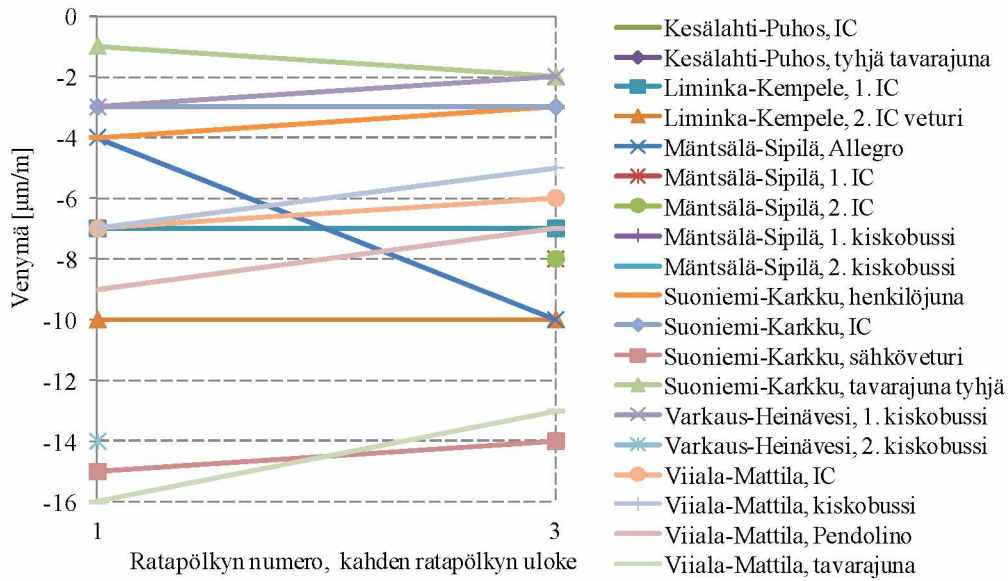
Mitatut venymät ratapölkyn yläpinnalla keskellä esitetään kuvassa 3.74 ja reunalla 500-510 mm päässä keskikohdalta kuvassa 3.75. Mitatut venymät ulokkeella esitetään kuvassa 3.76 ja venymämittausten keskiarvot taulukossa 3.30.



Kuva 3.74 Mitatut venymät ϵ_{ke} ratapölkyn keskellä yläpinnassa.



Kuva 3.75 Mitatut venymät ϵ_{ki} yläpinnassa reunalla kiskojen välissä. Symbolit: ks. Kuva 3.74.



Kuva 3.76 Mitatut venymät ε_{ul} ulokkeella yläpinnassa.

Taulukko 3.30 Mitattu venymä $\Delta\varepsilon$ ratapölkyn yläpinnalla, peräkkäisten mittausten (ju-nien) keskiarvo, $\mu\text{m}/\text{m}$.

Keskikohta	Airaksela-Kurkimäki	Kangas-Oulainen	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiala-Mattila
Ratapölkky 1	128	230	49	73	66	72	13	28
Ratapölkky 2	97	212	94	95	24	96	-12	38
Ratapölkky 3	83	219	84	88	37	73	2	33
Keskiarvo	102	220	75	85	43	80	-	33
Kiskon vier								
Ratapölkky 1	55	110	20	15	32	54	6	-
Ratapölkky 2	42	101	43	18	-4	55	-5	3
Ratapölkky 3	23	86	26	15	5	41	0	4
Keskiarvo	40	99	30	16	11	50	-	4
Uloke								
Ratapölkky 1	0	0	0	-9	-1	-6	-9	-10
Ratapölkky 3	0	0	-11	-9	-8	-6	-1	-8
Keskiarvo	-	-	-5	-9	-4	-6	-5	-9

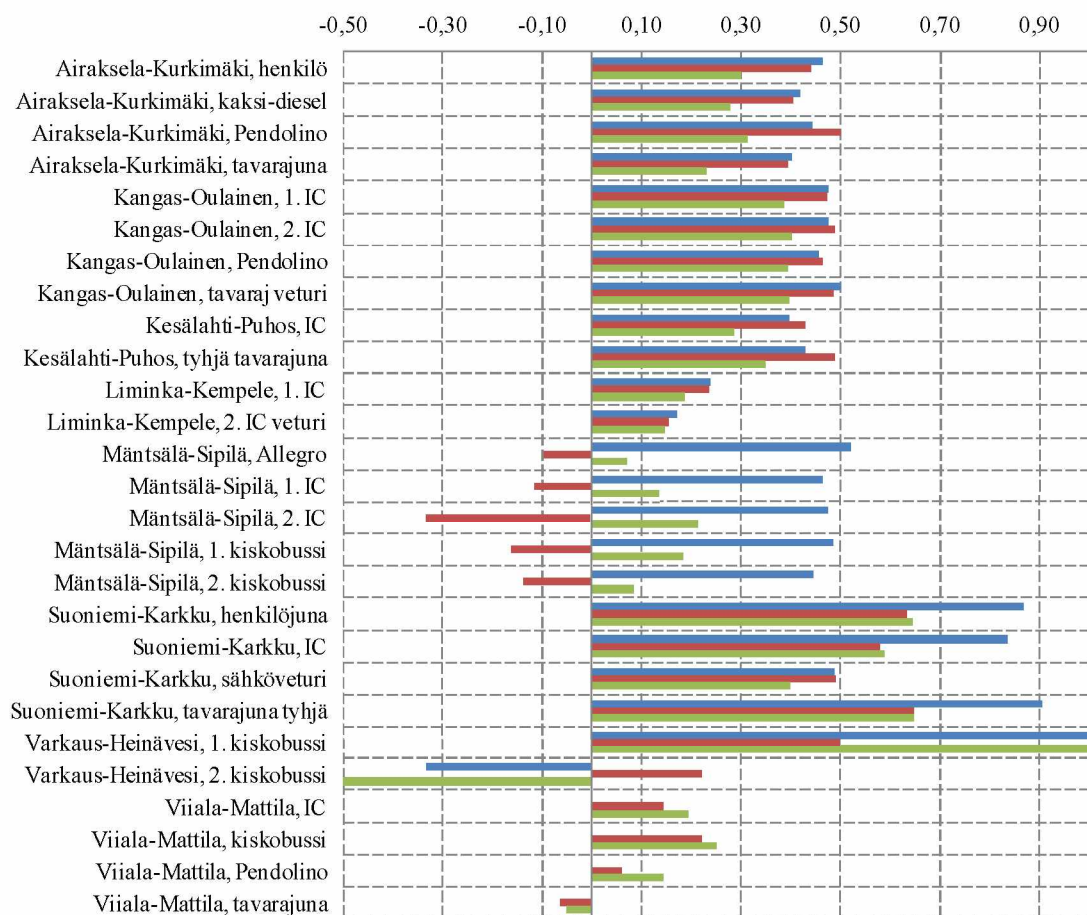
Mitatut venymät ratapölkyn yläpinnalla keskellä vaihtelivat välillä $\epsilon_{ke} = 33 \cdot 10^{-6} \dots 220 \cdot 10^{-6}$ ja kiskoja vierellä $\epsilon_{ki} = 4 \cdot 10^{-6} \dots 99 \cdot 10^{-6}$.

3.4.3.3 Tulosten analysointi

Venymän keskiarvoa vastaava taivutusmomentti voidaan laskea BP89-, BP99- ja B97-ratapölkyn keskikohdan taivutusvastuksen $W_{ke} = 1006000 \text{ mm}^3$ ja oletetun betonin kimmokertoimen $E_c = 37000 \text{ MPa}$ avulla: esim. Airaksela-Kurkimäki $M_{ke, \text{keskiarvo}} = \epsilon_{ke} \cdot E_c \cdot W_{ke} = 102 \mu\text{m/m} \cdot 37000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1006000 \text{ mm}^3 = 3,8 \text{ kNm}$.

Mitatut jännitykset (vetojännitys) ratapölkyn yläpinnalla keskellä olivat eri kohteissa välillä $\sigma_{c,ke} = E_c \cdot \epsilon_{c, \text{mitattu}} = 1,2 \dots 8 \text{ MPa}$ ja reunalla kiskoja välillä $\sigma_{c,ki} = 0,15 \dots 4 \text{ MPa}$. Suurimmat jännitykset olivat siis ratapölkyn keskikohdalla.

Mitattujen venymien suhde oli keskimäärin $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke} = 0,11 \dots 0,64$ (kuva 3.77 ja taulukko 3.31). Mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ki}/M_{ke} = \epsilon_{ki}/\epsilon_{ke} \cdot W_{ki}/W_{ke}$



Kuva 3.77 Mitattujen venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$ (tässä arvot väliltä $-0,5 \dots 1,0$), kiskon vieri / pölkyn keskikohta, ratapölkkyt 1 - 3.

Rataosuudella Varkaus-Heinävesi tehtiin mittaus kahden junan aikana ja osuus oli ainoa, jossa oli merkittävää hajontaa eri junien ylityksissä.

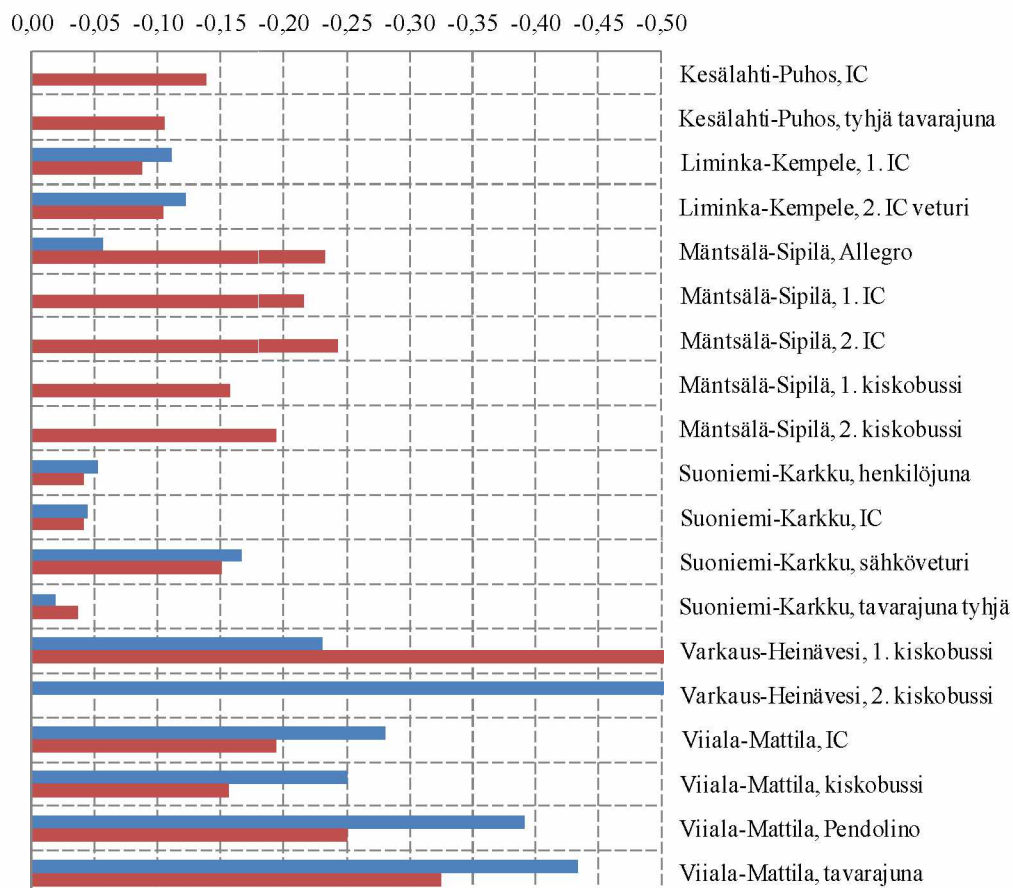
Viiala-Mattila -osuudella tavarajunan ylitys aiheutti kiskon viereen pölkyn yläpintaan pienen puristuman, muut junat venymän. Tavarajunan ylityksessä on ulokkeen alla ollut suuri pohjapaine, mikä näkyy myös ulokkeen yläpinnan suurena puristumana

(kuva 3.78 ja taulukko 3.32). Mitattu taivutusmomenttien suhde on $M_{ul}/M_{ke} = \varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke} \cdot W_{ul}/W_{ke}$ kyseisen rataosuuden pölkkytyypin mukaisesti.

Rataosuudella Mäntsälä-Sipilä keskimäinen ratapölkky tukeutui penkereeseen eri tavalla kuin viereiset ratapölkkyt. Kolmannen ratapölkyn pieni venymä kiskon vieressä ε_{ki} korreloi saman pölkyn ulokkeen suuren puristuman ε_{ul} kanssa. Tällöin kiskon alla on ollut suuri pohjapaine (kuva 3.78). Mäntsälä-Sipilä-rataosuudella vain yhdessä pölkkyssä mitattiin yhtä suuria absoluuttisen venymän arvoja kuin esimerkiksi rataosuudella Kesälahti-Puhos.

Taulukko 3.31 Mitattu yläpinnan venymien suhde, $\varepsilon_{ki}/\varepsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttinen suhde M_{ki}/M_{ke} (kiskon vieri / pölkyn keskikohta) peräkkäisten mittausten (juni-en) keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	Airak-sela-Kurki-mäki	Kan-gas-Ou-lainen	Kesä-lahti-Puhos	Limin-ka-Kempe-le	Mänt-sälä-Sipilä	Suo-nie-mi-Kark-ku	Varkaus-Heinäve-si	Vii-ala-Matti-la
Ratapölkky 1	0,43	0,48	0,41	0,20	0,48	0,77	0,45	-
Ratapölkky 2	0,43	0,48	0,46	0,19	-0,17	0,59	0,36	0,09
Ratapölkky 3	0,28	0,39	0,32	0,17	0,14	0,57	0,75	0,13
Keskiarvo $\varepsilon_{ki}/\varepsilon_{ke}$	0,38	0,45	0,40	0,19	-	0,64	0,52	0,11
M_{ki}/M_{ke}	0,57	0,67	0,60	0,28	-	0,76	0,78	0,16



Kuva 3.78 Venymien suhde $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$ (tässä arvoon -0,5 asti), uloke/keskikohta, ratapolkky 1 ja 3.

Varkaus-Heinävesi-rataosuudelta suhteeksi $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$ saatiin -1,2 ja -2,0. Ensimmäisen ratapolkyn ulokkeen mittaustulos puuttuu esim. Mäntsälä-Sipilästä ja toisen esim. Kesälahti-Puhokselta.

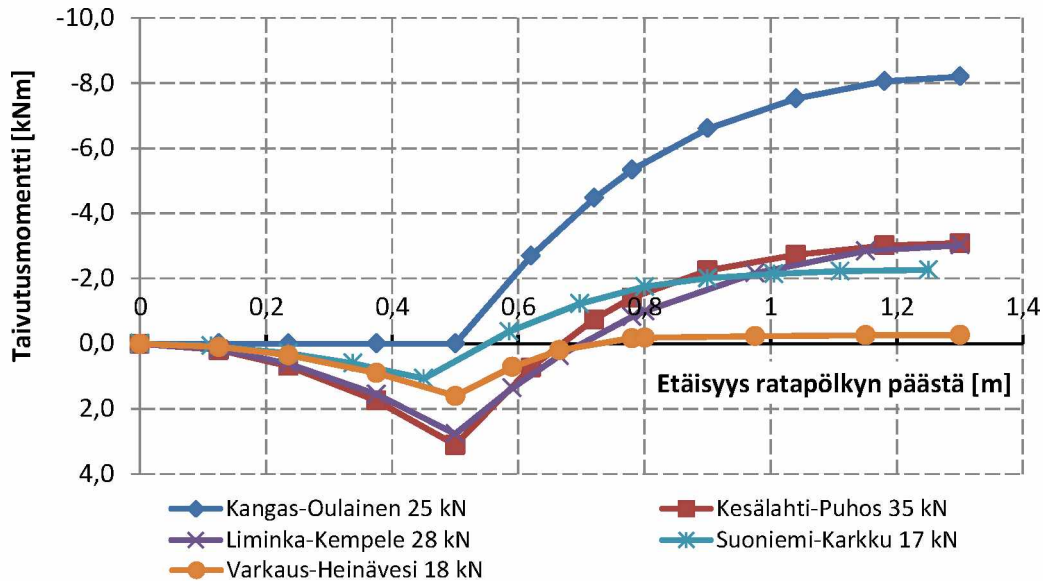
Taulukko 3.32 Mitattu yläpinnan venymien suhde $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttinen suhde M_{ul}/M_{ke} (uloke / pölkyn keskikohta), peräkkäisten mittausten (junien) keskiarvo.

Venymien ja momenttien suhde	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiala-Mattila
Ratapölkky 1	0,00	-0,12	-0,01	-0,07	-0,70	-0,34
Ratapölkky 3	-0,12	-0,10	-0,21	-0,07	-1,00	-0,23
Keskiarvo $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$	-0,06	-0,11	-0,11	-0,07	-0,85	-0,28
M_{ul}/M_{ke}	-0,11	-0,21	-0,21	-0,13	-1,52	-0,53

Mittausten mukaiset taivutusmomentti- ja pohjapainejakautumat

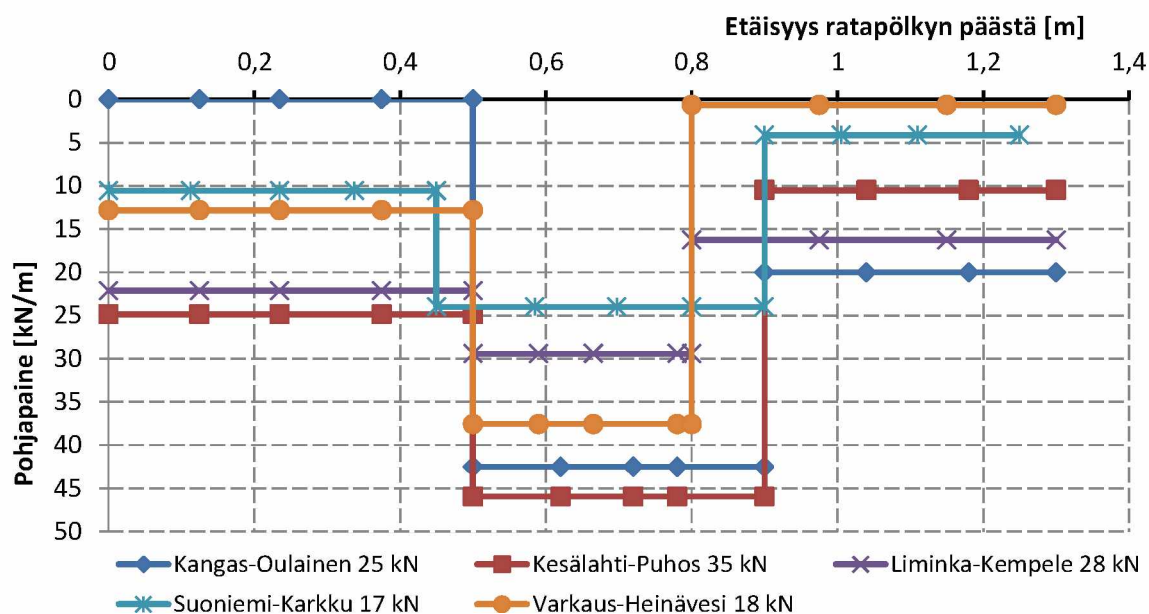
Mitattujen taivutusmomenttien suhteiden M_{ki}/M_{ke} ja M_{ul}/M_{ke} mukaiset taivutusmomenttijakautumat esitetään kuvassa 3.79 ja pohjapainejakautumat kuvassa 3.80. Momenttikuvaajien muoto etsittiin iteroimalla mitattujen taivutusmomenttisuhteiden mukaiseksi ensin vakiopyöräkuormalla $P = 100$ kN (yhden ratapolkyn kiskon kohta).

Sen jälkeen pyöräkuorma pienennettiin vastaamaan mitattuja absoluuttisia taivutusmomentteja M_{ul} , M_{ki} ja M_{ke} . Näissä iteraatiolaskelmissa hyödynnettiin vain ne ratapölkkyt, joista oli käytössä venymämittaustulos kaikista kolmesta mittauskohdasta.



Kuva 3.79 Syyskuussa 2011 mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja arvio yhteen pölkkyyn kohdistuneesta pyöräkuormasta.

Rataosuuden Kangas-Oulainen taivutusmomenttijakautuma poikkeaa selvästi muista taivutusmomenttijakautumista. Tämän rataosuuden iteraatiolaskelma perustuu ulokkeen mitattuihin nollavenymiin, joista on päätelty, että ulokkeen alle ei muodostunut pohjapainetta lainkaan. Kiskojen väliltä mitattujen absoluuttisten venymien mukaan tällä rataosuudella oli muita rataosuuksia selvästi suuremmat taivutusmomentit, vaikka pyöräkuorma ei merkittävästi poikennut muista tapauksista.



Kuva 3.80 Syyskuussa 2011 mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakautumat ja pyöräkuormat.

3.4.4 Mittaustulokset, helmi-maaliskuu 2012

3.4.4.1 Mittauskohteet ja mittauksen aikaiset havainnot

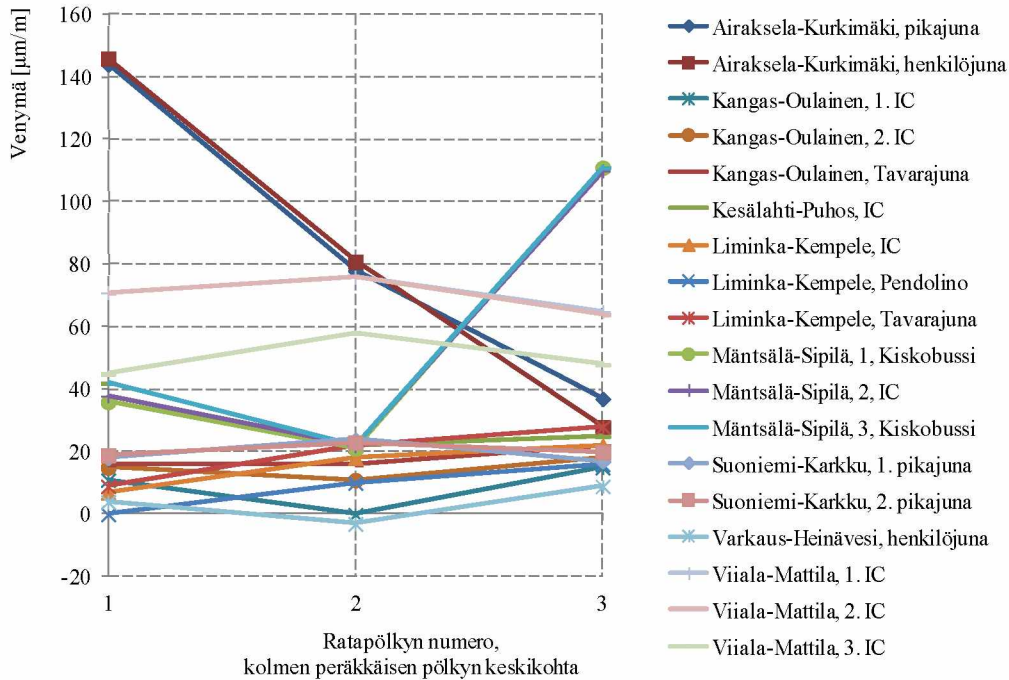
Mittaukset toteutettiin taulukossa 3.33 esitettyjen junien ylitysten aikana.

Taulukko 3.33 Tarkasteltavat rataosuudet, mittauspäivät, pölkkytyypit ja pölkkyjä kuormittaneet junat.

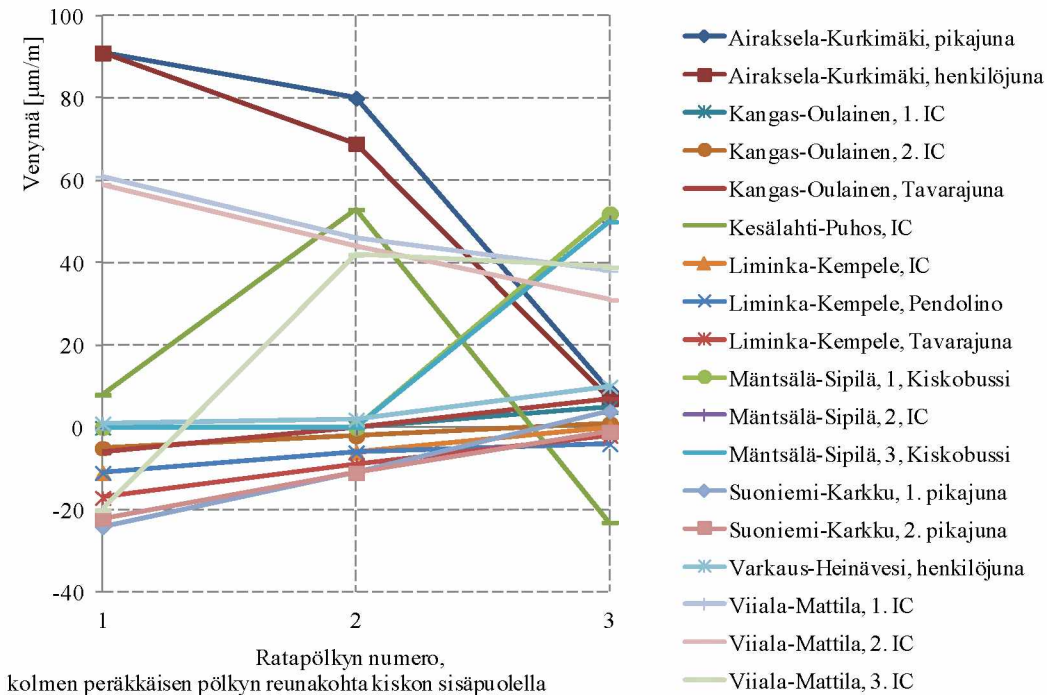
Airaksela-Kurkimäki	Kangas-Oulainen	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiiala-Mattila
22.2.2012	6.2.2012	9.2.2012	5.3.2012	28.2.2012	29.2.2012	8.2.2012	29.2.2012
B97 -02	B97 -03	B97	BP99	BP99 - 04	B75	B97 -02	BP89
pikajuna	IC Sr2	IC Sr1	IC Sr2	kiskobussi Sm4	pikajuna Sr1	henkilöjuna, dieselveturi	IC Sr2
henkilöjuna, Sr1	IC Sr2		Pendolino	IC Sr2	pikajuna Sr1		IC Sr2
	tavarajuna Sr1		tavarajuna, dieselveturi Dv12	kiskobussi (Flirt) Sm5			IC Sr2

3.4.4.2 Mitatut venymät

Kuvassa 3.81 on esitetty mitatut venymät ratapölkyn yläpinnalla keskellä ja kuvassa 3.82 reunalla 500-510 mm päässä keskikohdalta sekä kuvassa 3.83 ulokkeella. Taulukossa 3.34 on esitetty peräkkäisten junien mittaustulosten keskiarvot ratapölkkyittäin.

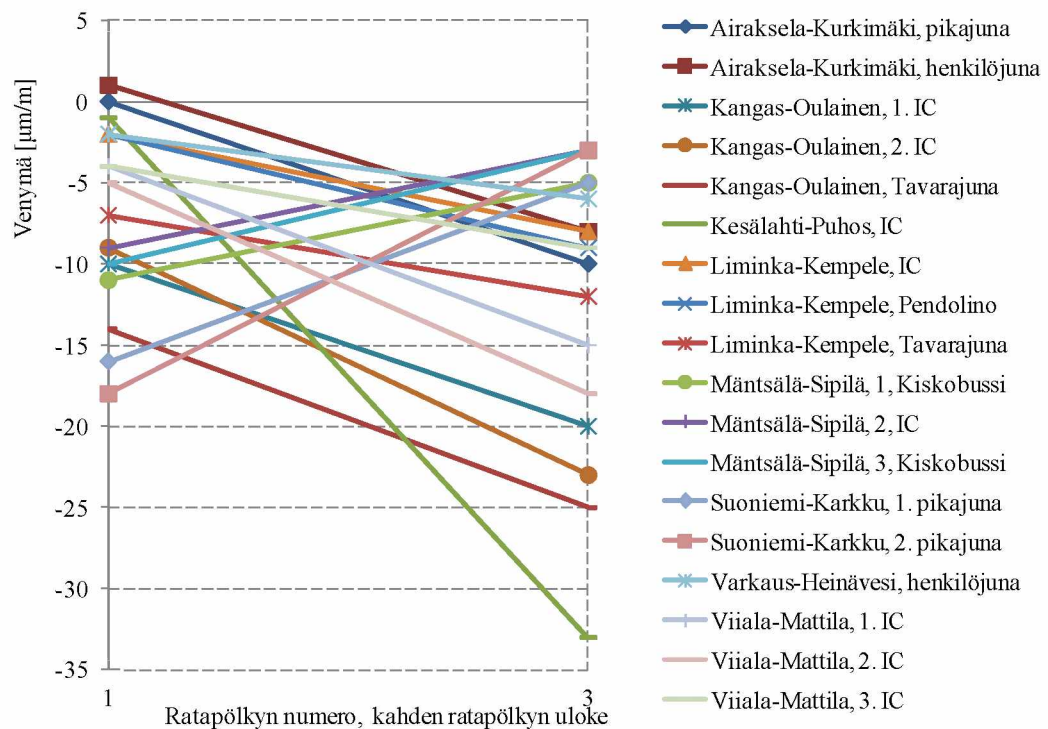


Kuva 3.81 Mitatut venymät ϵ_{ke} ratapölkyn keskellä yläpinnassa.



Kuva 3.82 Mitatut venymät ϵ_{kl} yläpinnassa reunalla kiskojen välissä.

Suurimmat vaihtelut peräkkäisten ratapölkkyjen kiskojen välisten venymien mittaustuloksissa olivat rataosuuksilla Airaksela-Kurkimäki ja Mäntsälä-Sipilä.



Kuva 3.83 Mitatut venymät ϵ ulokkeella yläpinnassa.

Taulukko 3.34 Mitattu venymä $\Delta\epsilon$ ratapölkyn yläpinnalla, peräkkäisten junien keskiarvo, $\mu\text{m/m}$.

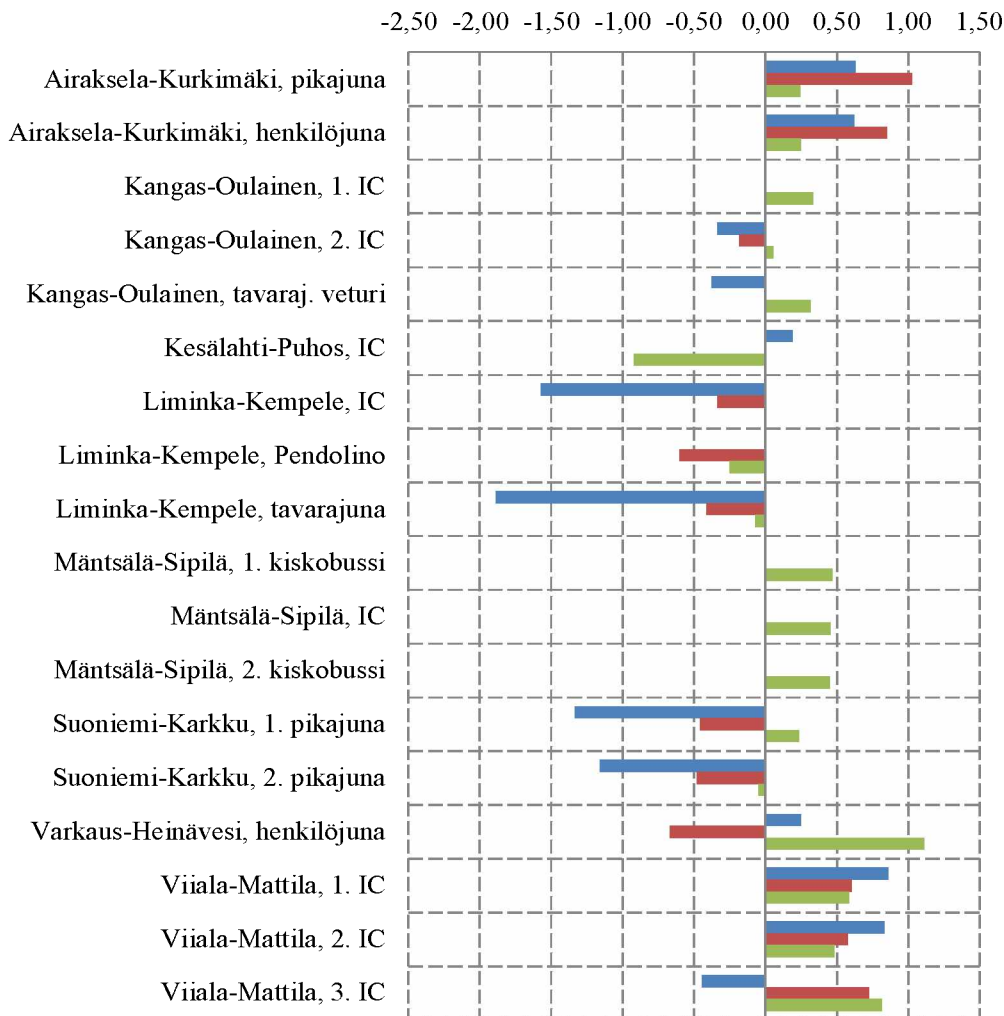
Keskikohta	Airaksela-Kurkimäki	Kangas-Oulainen	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiala-Mattila
Ratapölkky 1	145	14	42	5	39	19	4	62
Ratapölkky 2	80	-	-	17	22	24	-	70
Ratapölkky 3	33	18	25	22	111	19	9	59
Keskiarvo	86	-	-	15	57	20	-	64
Kiskon vieri								
Ratapölkky 1	91	-	8	-13	-	-23	1	33
Ratapölkky 2	75	-	-	-7	-	-11	-	44
Ratapölkky 3	8	4	-23	-2	51	2	10	36
Keskiarvo	58	-	-	-7	-	-11	-	38
Uloke								
Ratapölkky 1	1	-11	-1	-4	-10	-17	-2	-4
Ratapölkky 3	-9	-23	-33	-10	-4	-4	-6	-14
Keskiarvo	-4	-17	-17	-7	-7	-11	-4	-9

3.4.4.3 Tulosten analysointi

Venymän keskiarvoa vastaava taivutusmomentti voidaan laskea ratapölkyn tarkastelukohdan taivutusvastuksen W ja betonin kimmokertoimen $E_c = 37000$ MPa avulla.

Suurimmat jännitykset olivat ratapölkyn keskikohdalla. Muutamassa ratapölkkyssä havaittiin kiskon vieressä (kiskojen välissä) yläpinnan puristumia. Muutamissa mittauskohdissa venymäanturi ei toiminut.

Mitattujen venymien suhteet kiskon vieri / pölkyn keskikohta ($\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$) esitetään kuvassa 3.84 ja taulukossa 3.35.



Kuva 3.84 Mitattujen venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$, kiskon vieri / pölkyn keskikohta, rata-pölkkyt 1 - 3.

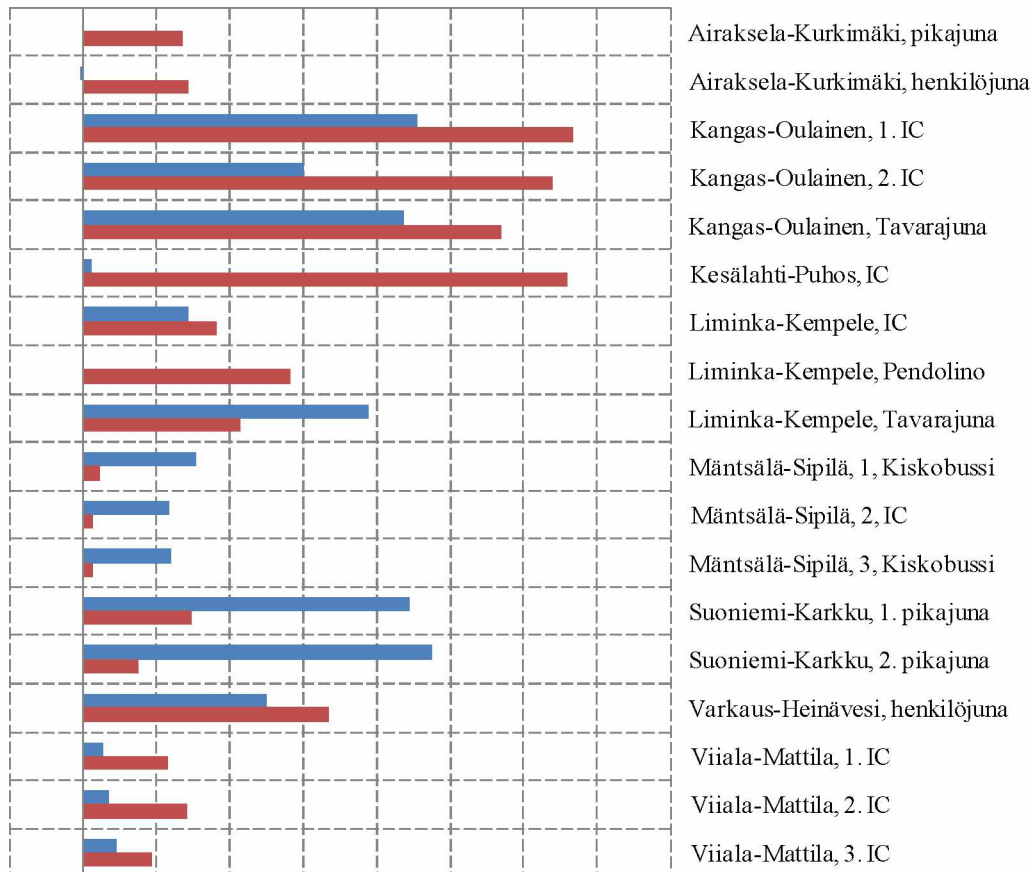
Suurimmat hajonnat peräkkäisten ratapölkkyjen venymien suhteiden välillä olivat helmikuun alkupuolen kovien pakkasten aikaisten mittausten rataosuuksilla Kangas-Oulainen ja Kesälahti-Puhos ja Varkaus-Heinävesi.

Taulukko 3.35 Mitattu yläpinnan venymien suhde, $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttinen suhde M_{ki}/M_{ke} (kiskon vieri / pölkyn keskikohta), peräkkäisten mittausten (juni-en) keskiarvo. Suluissa esitetyt laskentatulokset eivät ole kaikkien kolmen ratapölkynmittausten keskiarvoja.

Venymien suhde $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$	Airak-sela-Kurki-mäki	Kan-gas-Ou-lainen	Kesä-lahti-Puhos	Limin-ka-Kempe-le	Mänt-sälä-Sipilä	Suo-nie-mi-Karkku	Var-kaus-Heinä-vesi	Vii-ala-Matti-la
Ratapölkky 1	0,63	-	0,19	-	-	-1,25	0,25	0,42
Ratapölkky 2	0,94	-	-	-0,45	-	-0,47	-0,67	0,64
Ratapölkky 3	0,25	0,24	-0,92	-0,11	0,46	0,09	1,11	0,63
Keskiarvo $\epsilon_{ki}/\epsilon_{ke}$	0,60	-	(0,36)	(-0,28)	-	-0,54	0,23	0,56
M_{ki}/M_{ke}	0,89	(0,36)	(0,53)	(-0,42)	(0,69)	-0,64	0,34	0,83

Mitattujen venymien suhteet uloke/keskikohta ($\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$) esitetään kuvassa 3.85 ja taulukossa 3.36.

0,20 0,00 -0,20 -0,40 -0,60 -0,80 -1,00 -1,20 -1,40 -1,60



Kuva 3.85 Venymien suhde $\epsilon_{ul}/\epsilon_{ke}$ uloke/keskikohta, ratapölkkyt 1 ja 3.

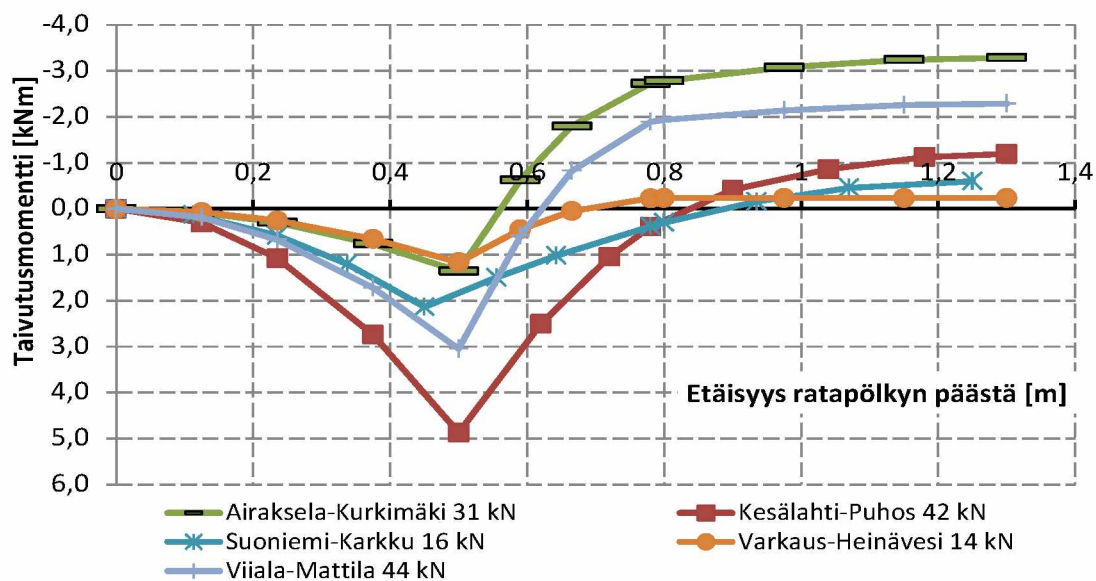
Muutamat mitatut ratapölkyn keskikohdan venymät olivat pieniä (kuva 3.81). Siksi suhde $\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$ muodostui joissakin ratapölkkyissä suureksi. Näin tapahtui varsinkin kovien pakkasten aikana.

Taulukko 3.36 Mitattu yläpinnan venymien suhde $\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$ ja taivutusmomenttinen suhde M_{ul}/M_{ke} (uloke / pölkyn keskikohta), peräkkäisten mittausten (junien) keskiarvo.

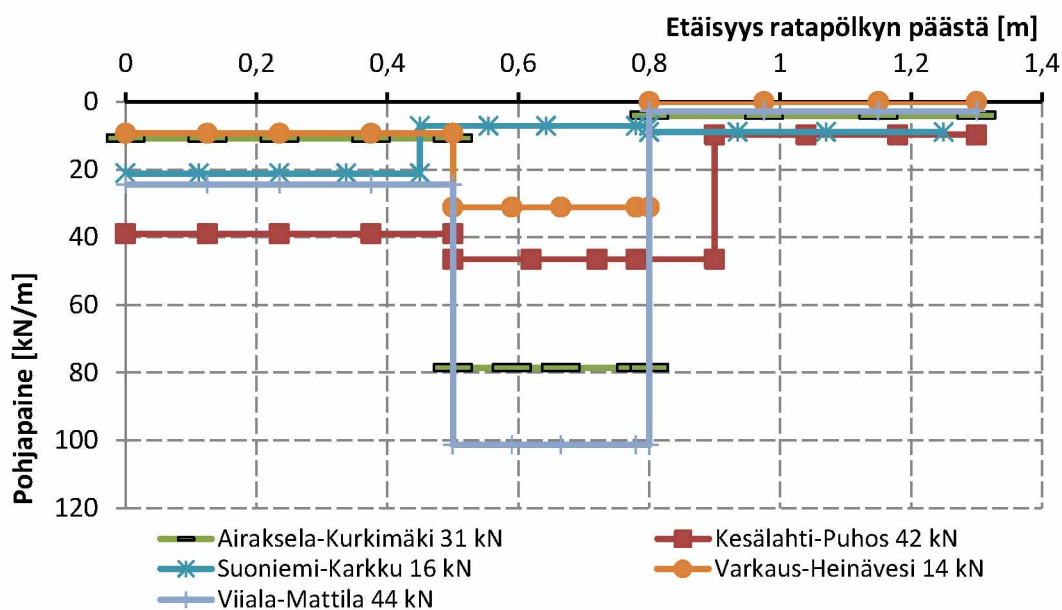
Venymien suhde, $\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$	Airak-sela-Kurki-mäki	Kan-gas-Oulai-nen	Kesä-lahti-Puhos	Limin-ka-Kempe-le	Mänt-sälä-Sipilä	Suo-niemi-Karkku	Var-kaus-Hei-näve-si	Vii-ala-Matti-la
Ratapölkky 1	0,00	-0,79	-0,02	-	-0,26	-0,92	-0,50	-0,07
Ratapölkky 3	-0,28	-1,25	-1,32	-0,45	-0,03	-0,22	-0,67	-0,23
Keskiarvo $\varepsilon_{ul}/\varepsilon_{ke}$	-0,14	-1,02	-0,67	-	-0,15	-0,57	-0,58	-0,15
M_{ul}/M_{ke}	-0,25	-1,83	-1,20	(-0,89)	-0,29	-0,97	-1,04	-0,29

Mittausten mukaiset taivutusmomentti- ja pohjapainejakautumat

Iteraatiolaskenta taivutusmomentti- (kuva 3.86) ja pohjapainejakautumakuvaajien (kuva 3.87) määrittämiseksi toteutettiin samoin kuin syksyn 2011 mittaustuloksille. Kuten syksyllä 2011 muodostui suurin taivutusmomentti kiskon kohdalle rataosuudel-la Kesälahti-Puhos.



Kuva 3.86 Helmi-maaliskuussa 2012 mitattujen venymien mukaiset taivutusmomenttijakautumat ja arvio yhteen pölkkyyn kohdistuneesta pyöräkuormasta.



Kuva 3.87 Helmi-maaliskuussa 2012 mitattujen venymien mukaiset pohjapainejakautumat ja pyöräkuormat.

3.4.5 Yhteenveto kolmen vuodenajan mittauksista

Venymämittauksien mukaiset pyöräkuormat

Arviot ratapölkkyihin kohdistuneista pyöräkuormista syntyivät iteraatioprosessin tuloksena. Päättavoite laskennassa oli kuitenkin selvittää pohjapainejakautumat eri rataosuuksilla eri vuodenaikoina. Pyöräkuormien suuri vaihtelu perustuneeseen siihen, että venymämittaustuloksista poimittiin pääasiassa vaunujen pyöräkertojen kohdat, ja muutamilla rataosuuksilla veturit vetivät mittausten aikana tyhjiä tavaravaunuja.

Yksittäisten ratapölkkyjen venymät eri vuodenaikoina

Eri vuodenaikojen ja penkereen jäätymisen vaikutusten seuraamiseksi edellä esitetyistä tuloksista poimittiin tiettyjen ratapölkkyjen venymät, yleensä vaunujen pyöräkertojen kohdilta. Mäntsälä-Sipilä -rataosuudelta on tässä esitelty molemmat reunoilta sijainneet ratapölkkyt, muista vain toinen.

Keväällä ja syksyllä 2011 olivat venymät ratapölkkyjen yläpinnalla taulukon 3.37 mukaan hyvin samankaltaiset useilla rataosuuksilla. Kevättalvella 2012 sitä vastoin näissä samoissa ratapölkkyissä havaittiin hyvin erilaiset venymät. Ratapenkereen jäätymisellä oli siis selvä vaikutus ratapölkkyjen rasituksiin.

Taulukko 3.37 Yksittäisten ratapölkkyjen venymät eri vuodenaikoina neljällä rataosuudella.

Ajankohta	Airaksela-Kurkimäki	Kangas-Oulainen	Kesälahti-Puhos	Liminka-Kempele
Kevät 2011	IC	2. IC	tyhjä tavarajuna	1. henkilöjuna
keskikohta	57	224	64	60
kiskon vier	21	98	14	29
Syksy 2011	henkilöjuna	2. IC	tyhjä tavarajuna	1. IC
keskikohta	70	223	66	63
kiskon vier	21	106	23	15
uloke	-	-	-7	-7
Kevättalvi 2012	henkilöjuna	2. IC	IC	IC
keskikohta	28	15	25	22
kiskon vier	7	-5	-23	0
uloke	-8	-9	-33	-8

Henkilöjunan veturi oli raskaampi kuin IC:n vaunu. Rataosuudella Suoniemi-Karkku mitattiin vuonna 2011 taulukon 3.38 mukaisesti henkilöjunan veturin ylityksen aikana (kevät) sulassa ratapenkereessä noin kaksinkertaiset ratapölkyn rasitukset verrattuna IC:n vaunun ylityksen aikaisiin rasituksiin (syksy).

Taulukko 3.38 Yksittäisten ratapölkkyjen venymät eri vuodenaikoina neljällä rataosuudella.

Ajankohta	Mäntsälä-Sipilä	Mäntsälä-Sipilä	Suoniemi-Karkku	Varkaus-Heinävesi	Viiala-Mattila
Kevät 2011	IC	IC	h-juna, veturi	kiskobussi	1. IC
keskikohta	71	-	138	217	-70
kiskon vier	27	-	95	108	-49
Syysy 2011	1. IC	1. IC	IC	1. kiskobussi	IC
keskikohta	69	37	67	13	31
kiskon vier	32	5	56	16	6
uloke	-	-8	-3	-3	-6
Kevättalvi 2012	IC	IC	1. pikajuna	henkilöjuna	1. IC
keskikohta	110	38	18	9	71
kiskon vier	50	-	-24	10	61
uloke	-3	-9	-16	-6	-4

Poikkeus edellä mainittuun jäätyneen ja sulan penkereen käyttäytymisen eroon havaittiin rataosuudella Mäntsälä-Sipilä jälkimmäisessä ratapölkkyssä ja rataosuudella Varkaus-Heinävesi, joissa käyttäytyminen oli samanlaista syksyllä 2011 ja talvella 2012.

Mittaustulosten mukaan ratapölkkyjen yläpinnat rataosuudella Viiala-Mattila olivat puristettuja keväällä 2011. Tällöin ratapölkkyjen tuennat keskittyivät pölkkyjen päiden eli ulokkeiden alle ja tilannetta voidaan pitää poikkeuksena. Samaan aikaan muilla rataosuuksilla yläpinnoissa oli vetoa, jolloin ratapölkkyjen tuennat keskittyivät kiskojen väliselle alueelle. Useilla rataosuuksilla sulan penkereen aikana ratapölkyn päät olivat joko kokonaan irti raidesepelin pinnasta tai tuenta pään alla oli hyvin pieni.

Taipuman laskenta

Mittaustuloksista ei voi laskea taipumia täsmällisesti, koska tieto alustaluvusta ratapölkyn eri kohdilla puuttuu. Samoin täsmällinen kuormitustieto vaunujen pyöräkertojen kohdilta puuttuu. Myös ratapölkyn poikkileikkaus ja sen myötä taivutusjäykkyys muuttuu useissa kohdissa pölkyn pituuden matkalla.

Mittausten tulkinnasta

Kevään 2011 jälkeen asennettiin venymäanturit myös ratapölkkyjen ulokkeiden yläpintaan, jotta saatiin helpommin tulkittavat, yksiselitteiset mittaustulokset. Kolme mittauskohtaa pölkkyä kohden helpotti pohjapaine- ja taivutusmomenttijakautumisen määrittämistä.

Peltokangas et al. (2013) ovat mitanneet ratapölkkytutkimuksen mittauskohteissa ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia kiihtyvyyssantureilla 15-20 peräkkäisen ratapölkyn osuuksilta. Taulukossa 3.39 esitettävien mittaustulosten perusteella rata-penkereen routaantumisen on erittäin merkittävä vaikutus palautuviin painumiin. Myös ratapölkyn ominaisuuksilla, ja erityisesti tukeutumistilanteella, on jonkin verran merkitystä palautuvien painumien suuruuteen.

Taulukko 3.39 Kiihtyvyyssantureilla mitatut keskimääräiset ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat (Peltokangas 2012).

Palautuva painuma [mm]	Sula pengер	Jäätynyt pengер	Jäykkyysien suhde
Airaksela – Kurkimäki	1,50	0,36	4,2
Kangas – Oulainen	1,55	0,26	6,0
Kesälahti – Puhos	0,93	0,39	2,4
Liminka – Kempele	2,47	0,46	5,4
Mäntsälä – Sipilä	0,70	0,34	2,1
Suoniemi – Karkku	1,00	0,19	5,3
Varkaus – Heinävesi	0,43	0,13	3,3
Viiala – Mattila	0,90	0,59	1,5
Keskiarvo			3,8

Koska jäätynyt pengер on moninkertaisesti sulaa pengertä jäykempi, on perusteltua päätellä, että myös talven kylmän sään pohjapainejakautumat ja ratapölkyn yläpinnan venymät poikkeavat sulan maan jakson pohjapainejakautumista ja pölkyn venymistä.

Pohjapaineet

Kaikkina vuodenaikoina pohjapaine keskittyi lähelle kiskoja, eli 300-400 mm leveydelle kiskoista raiteen keskustan suuntaan. Jakautumat kyseiseen mitattuun suurimpaan pohjapaineeseen verrattuna olivat karkeasti seuraavat (vrt. esim. kuva 3.80):

- kevät 2011: uloke 31 % ja keskiosa 13 % kiskon viereisestä pohjapaineesta,
- syksy 2011: uloke 39 % ja keskiosa 29 % kiskon viereisestä pohjapaineesta,
- talvi 2012: uloke 39 % ja keskiosa 10 % kiskon viereisestä pohjapaineesta.

Ulokkeen pituus oli yleensä 500 mm, ja keskiosan pituus oli pohjapainejakautumataulukoiden mukaan noin 500 mm keskipisteestä molempiin suuntiin, joten kiskon viereisen osan pituus oli tyypillisesti 300 mm. Yllä esitetty yhteenveto on esitetty toisella tavalla taulukossa 3.40.

Taulukko 3.40 Pohjapaineen prosentuaalinen jakautuminen eri alueille ratapölkyn alapinnalla.

Vuodenaika	Pohjapaine (kN/m) %		
	Uloke	Kiskon vier	Keskiosa
Kevät 2011	21	69	10
Syksy 2011	23	60	17
Talvi 2012	26	67	7
Keskiarvo	23	65	12

3.4.6 Tulosten laskennallinen vertailu

Ratapölkyn rasitukset eri pohjapainejakautumilla sekä ratapenkereen 2D-FEM-laskelmat ratapölkyn ja maan yhteistoiminnan tarkastelua varten esitetään luvussa 4.

3.4.6.1 Mittausten mukainen ratapölkyn taivutusmomenttijakautuma

Taulukkoon 3.41 on koottu kenttäkokeissa mitattujen ratapölkkyjen yläpinnan venymien mukaiset taivutusmomentit. Eri vuodenaikoina mitattujen keskiarvojen lisäksi esitetään mitatut maksimi- ja minimiarvot sekä tulosten hajonta.

Ratapölkyn keskikohdan taivutusmomentti on laskettu venymän ε_{ke} , taivutusvastuksen W_{ke} ja oletetun betonin kimmokertoimen $E_c = 37000 \text{ MPa}$ avulla lausekkeella $M = \varepsilon_{ke} \cdot E_c \cdot W_{ke}$. Kiskon kohdan momentti on saatu laskemalla ensin edellä mainitulla tavalla ulokkeen taivutusmomentti kohdassa 0,235 m ratapölkyn päästä ja kertomalla saatu tulos etäisyyksien neliöiden suhteella $(0,5 \text{ m} / 0,235 \text{ m})^2 = 4,53$. Laskenta perustuu oletukseen tasaisesta pohjapaineesta ulokkeen alapinnalla.

Taulukko 3.41 Kenttäkokeissa eri rataosuuksilla mitatut taivutusmomentit ratapölkyn keskikohdalla ja kiskon kohdalla, kNm (n = mittaustulosten lukumäärä).

Ratapölkyn keskikohta	keskiarvo	maksimi	minimi	keskihajonta
Kevät 2011, $n=54$	-2,9	2,7	-8,4	3,2
Syksy 2011, $n=83$	-3,0	0,5	-10,1	2,5
Alkutilvi 2012, $n=52$	-1,5	0,1	-5,4	1,3
Kiskon kohta				
Syksy 2011, $n=32$	2,4	6,6	0,2	1,5
Alkutilvi 2012, $n=36$	2,8	9,9	-0,3	2,3

Seuraavaan vertailutarkasteluun valittiin satunnaisesti viisi sellaista yksittäistä tapausta, joissa mittaustulos oli käytössä kaikissa kolmessa tarkasteltavan ratapölkyn mittauskohdassa yhden pyöräkerran ylityksen aikana. Tavoitteena oli arvioida kenttämittausten ja käytetyn laskentamenetelmän luotettavuutta.

Mitattujen venymien mukaisten taivutusmomenttien vertailu veturin painon mukaan laskettuihin taivutusmomentteihin, Kangas-Oulainen, tavarajuna, vrt. taulukko 3.42.

Seuraavassa tarkastellaan yksittäistä ratapölkkyä, tässä tapauksessa kolmesta peräkäisestä instrumentoidusta pölkystä viimeistä. Veturin ylityksen aikana mitattujen yläpinnan venymien mukaan taivutusmomentit lasketaan seuraavasti:

- Keskikohdalla $\varepsilon = 22 \text{ } \mu\text{m/m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(22/1000000) \cdot 37000 \cdot 1006000 = -0,8 \text{ kNm}$
- Kiskon vieressä $\varepsilon = 7 \text{ } \mu\text{m/m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(7/1000000) \cdot 37000 \cdot 1500000 = -0,4 \text{ kNm}$
- Ulokkeessa $\varepsilon = -25 \text{ } \mu\text{m/m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(-25/1000000) \cdot 37000 \cdot 1800000 = 1,7 \text{ kNm}$

Kuormituksen ja iteroidun pohjapainejakautuman perusteella taivutusmomentit lasketaan seuraavasti:

Tavarajunan veturina oli raskas sähköveturi SR1, jonka staattisen akselipainon keskiarvo on 214 kN. Kuormitus ratapölkyn päätä kohden karkealla kuorman jakautumisoletuksella oli $214 \text{ kN}/(2 \cdot 2) = 53,5 \text{ kN}$. Tällä kuormalla ja hyvin pienellä keskiosan pohjapaineella ratapölkkyä rasittivat seuraavat taivutusmomentit: keskikohta -0,8 kNm, kiskon vieri -0,2 kNm ja uloke 1,2 kNm. Päiden alla näitä momentteja vastaava pohjapaine oli 44 kN/m ja kiskon vieressä (sisäpuolella) 0,4 m matkalla 78 kN/m.

Mitattujen venymien mukaisten taivutusmomenttien vertailu veturin painon mukaan laskettuihin taivutusmomentteihin, Kesälahti-Puhos, tavarajuna, vrt. taulukko 3.42.

Veturin ylityksen aikana mitattujen yläpinnan venymien mukaan taivutusmomentit lasketaan seuraavasti:

- keskikohdalla $\varepsilon = 129 \text{ } \mu\text{m}/\text{m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(129/1000000) \cdot 37000 \cdot 1006000 = -4,8 \text{ kNm}$
- kiskon vieressä $\varepsilon = 22 \text{ } \mu\text{m}/\text{m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(22/1000000) \cdot 37000 \cdot 1500000 = -1,2 \text{ kNm}$
- ulokkeen $\varepsilon = -22 \text{ } \mu\text{m}/\text{m} \Rightarrow M = \varepsilon \cdot E \cdot W = -(-22/1000000) \cdot 37000 \cdot 1800000 = 1,5 \text{ kNm}$

Kuormituksen ja iteroidun pohjapainejakautuman perusteella taivutusmomentit lasketaan seuraavasti:

Tavarajunan veturina oli välraskas dieselveturi DV12, jonka staattisen akselipainon keskiarvo on 162 kN. Kuormitus ratapölkyn päätä kohden karkealla kuorman jakautumisoletuksella oli $162 \text{ kN}/(2 \cdot 2) = 40,5 \text{ kN}$. Tällä kuormalla ja miltei tasaisella pohjapainejakautumalla ratapölkkyä rasittivat seuraavat taivutusmomentit: keskikohta -4,8 kNm, kiskon vieri -0,7 kNm ja uloke 1 kNm.

Taulukko 3.42

Yksittäisten mitattujen venymien mukaisten rata-pölkkyjen taivutusmomenttien ja veturikuorman mukaisten taivutusmomenttien vertailu. Tässä esitetään taulukkomuodossa edellä lasketut kaksi tapausta.

		Kangas-Oulainen, tavarajunan veturi Sr1, 6.2.2012			Kesälahti-Puhos, väliraskas die- selveturi Dv12, 13.9.2011		
		Akselipaino [kN]: 214			Akselipaino [kN]: 162		
		Uloke	Kiskon vieri	Keski- kohta	Uloke	Kiskon vieri	Keskikohta
Mitattu venymä	ε [10^{-6}]	-25	7,0	22,0	-22	22,0	129,0
Taivutusvastus	W [m^3]	1800000	1500000	1006000	1800000	1500000	1006000
Taivutusmomentti, mitatun venymän mukaan laskettu	M [kN/m]	1,7	-0,4	-0,8	1,5	-1,2	-4,8
Osapituus	L [m]	0,5	0,4	0,8	0,5	0,4	0,8
Pohjapaine	P [%]	42	58	1	45	25	30
Pohjapaine	p [kN/m]	44	78	1	36	26	30
Taivutusmomentti, akselipainon mukaan laskettu	M [kN/m]	1,2	-0,2	-0,8	1,0	-0,7	-4,8

Näiden kahden tapauksen lisäksi on taulukoihin 3.43 ja 3.44 laskettu myös kolmen muun yksittäisen ratapölkyn vertailulaskelmat junan kuormituksen aikana.

Taulukko 3.43

Yksittäisten mitattujen venymien mukaisten rata-pölkkyjen taivutusmomenttien ja veturikuorman mukaisten taivutusmomenttien vertailu.

		Liminka-Kempele, Pendolino, 5.3.2012			Liminka-Kempele, Pendolino, 5.3.2012		
		Akselipaino [kN]: 142			Akselipaino [kN]: 142		
		Uloke	Kiskon vieri	Keski- kohta	Uloke	Kiskon vieri	Keskikohta
Mitattu venymä	ε [10^{-6}]	-2	-11,0	0,0	-9	-4,0	16,0
Taivutusvastus	W [m^3]	1911000	1500000	1006000	1911000	1500000	1006000
Taivutusmomentti, mitatun venymän mukaan laskettu	M [kN/m]	0,1	0,6	0,0	0,6	0,2	-0,6
Osapituus	L [m]	0,5	0,4	0,8	0,5	0,3	1
Pohjapaine	P [%]	46	52	2	42	50	8
Pohjapaine	p [kN/m]	33	46	2	30	59	6
Taivutusmomentti, akselipainon mukaan laskettu	M [kN/m]	0,9	0,6	0,0	0,8	0,2	-0,6

Taulukko 3.44

Yksittäisten mitattujen venymien mukaisten ratapölkkyjen taivutusmomenttien ja veturikuorman mukaisten taivutusmomenttien vertailu.

		Viiala-Mattila, Pendolino, 29.9.2011		
		Akselipaino [kN]: 142		
		Uloke	Kiskon vieri	Keskikohta
Mitattu venymä	ε [10 ⁻⁶]	-7	4,0	28,0
Taivutusvastus	W [m ³]	1911000	1500000	1006000
Taivutusmomentti, mitatun venymän mukaan laskettu	M [kN/m]	0,5	-0,2	-1,0
Osapituus	L [m]	0,5	0,3	1
Pohjapaine	P [%]	39	52	9
Pohjapaine	p [kN/m]	28	61	6
Taivutusmomentti, akselipainon mukaan laskettu	M [kN/m]	0,8	-0,2	-1,0

Mitattujen venymien mukaisten ratapölkkyjen taivutusmomenttien ja veturin painon mukaan laskettujen taivutusmomenttien vastaavuutta voidaan pitää hyvänä. Akselipainon jakautuminen laskettiin karkeasti ja taivutusmomenttijakautuman herkkyyss arvioidun pohjapainejakautuman suhteen on suuri. Voidaan siis todeta, että työssä toteutetun mukaisesta mittausjärjestelystä saatavista venymätiedoista on iteroitavissa venymiä hyvin vastaava pohjapainejakautuma.

Veturin painon mukaan lasketut ratapölkkyjen taivutusmomentit olivat joko hieman pienemmät kuin mitattujen venymien mukaiset taivutusmomentit tai hieman suuremmat. Esimerkkeinä tarkastelluissa tapauksissa suurin ero oli talvella mitatussa ensimmäisessä ratapölkkyssä rataosuudella Liminka-Kempele.

Parhaiten taivutusmomentit täsmäsivät, kun laskelmissa iteroitava pohjapainejakautuma oli myöhemmin esitettävän taulukon 4.2 tuentatapauksien 2 ja 5 yhdistelmän mukainen eli näiden tuentatapausten keskiarvo. Vain rataosuudella Kesälahti-Puhos oli pohjapaine miltei tasainen koko ratapölkyn matkalla (taulukko 4.2/tuentatapaus 1).

3.5 Ratapölkyn kuormitus, tuenta ja rasitukset tukikerroksen seulontavaiheessa

Raidesepelin seulontavaiheessa saattaa ratapölkyn päiden alle jäädä rako kuvan 3.88 mukaisesti. Tällöin tuennan sijaitessa vain ratapölkyn keskiosalla saattaa kuormituksiksi tulla kuitenkin täysinäisen raidesepelivaunun paino.



Kuva 3.88 Raidesepelin seulontavaihe.

Taivutusmomentti ratapölkyn keskellä akselipainolle 275 kN, kun ratapölkyn tuenta sijaitsee kiskojen välissä 1,6 m matkalla, lasketaan seuraavasti:

Pohjapaineeseen perustuva laskenta

Tasainen pohjapaine $p = 275 \text{ kN} / 2 / 1,6 \text{ m} = 85,9375 \text{ kN/m}$. (RATO 11)

Taivutusmomentti $M_{\text{kesk}} = pL^2/8 = 85,9375 \text{ kN/m} \cdot (1,6 \text{ m})^2/8 = 27,5 \text{ kNm}$.

Ratapölkyn BP99 halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti ratapölkyn keskikohdalla kohdan 2.3.6 mukaan on $M_{R,\text{halkeilu}} = 15,2 \text{ kNm}$. Joten tämä yhden työvaiheen rasitus ratapölkylle näin isolla akselipainolla ja tällä pohjapainejakautumaoletuksella on todella suuri ja em. oletuksilla johtaisi hyvin todennäköisesti pölkyn halkeamaan.

Laskennallista taivutusmurtomomenttia $M_{R,\text{murto}} = 33,7 \text{ kNm}$ vastaava taivutusmomentti syntyy esim. siten, että kiskon vieressä (sisäpuolella) 0,3 m matkalla on pohjapaine $p = 34 \text{ kN/m}$ ja keskellä 1 m matkalla $p = 117 \text{ kN/m}$. Tämä saattaa toteutua, jos raiteen keskellä raidesepeli on selvästi tiiviimpää kuin kiskon vieressä.

Kuormituskokeissa saavutetut uusien ratapölkkyjen keskimääräiset taivutusmomentit keskikohdalla kohdan 2.6.6.1 mukaan ovat $M_{R,\text{halkeilu}} = 18 \text{ kNm}$ ja $M_{R,\text{murto}} = 39 \text{ kNm}$.

Alustalukutarkastelu FEM-laskentana

Kun laskennassa sovelletaan alustalukua $16,7 \text{ MN/m/m}$ ratapölkyn keskiosan alapinnalla $1,6 \text{ m}$ matkalla, saadaan taivutusmomentin suuruudeksi kohdan 4.2 laskenta-periaatteilla $M_{\text{kesk}} = 25,3 \text{ kNm}$ ja painumaksi ratapölkyn päissä $9,1 \text{ mm}$.

Kun alustaluku 100 MN/m/m tukee ratapölkkyä keskiosan alapinnalla $1,6 \text{ m}$ matkalla, saadaan taivutusmomentin suuruudeksi $M_{\text{kesk}} = 17,7 \text{ kNm}$ ja painumaksi ratapölkyn päissä $3,8 \text{ mm}$.

Kun alustaluku on suurempi kuin 100 MN/m/m , saattaa ratapölkyn taipumisen vuoksi muodostua pieni rako keskikohdan ja tukikerroksen välille.

Alustalukulaskelmissa ratapölkyn tuenta keskittyy kiskon viereen, jolloin keskikohdan taivutusmomentti jää pienemmäksi kuin tasaisen pohjapaineen tapauksessa. Ratapölkyn halkeiluriski on kuitenkin suuri tukikerroksen seulontavaiheessa varsinkin, jos kiskon vieressä raidesepele ei ole yhtä tiivistä kuin raiteen keskellä.

4 Ratapölkyn rasiitusten määrittäminen uusien pölkkyjen suunnittelua varten

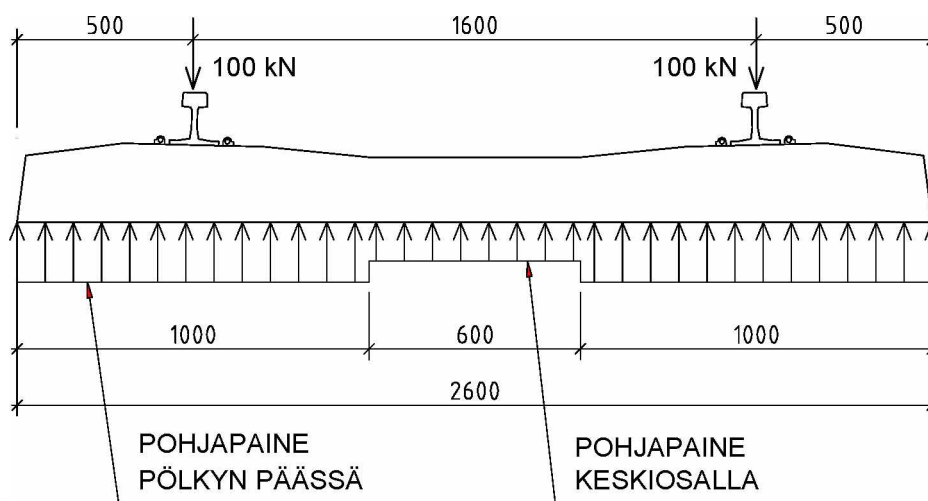
4.1 Ratapölkyn rasiitukset eri pohjapainejakautumilla

Laskennan tavoitteena oli vertailla eri pohjapainejakautumien merkitystä ratapölkyn rasiitusten kannalta. Taulukossa 4.1 esitettävät laskennan peruslähtötiedot pidettiin samoina koko laskennan ajan. Täten pelkkä pohjapainejakautuma vaihteli, ei pyöräkuorma.

Taulukko 4.1 Laskennan peruslähtötiedot.

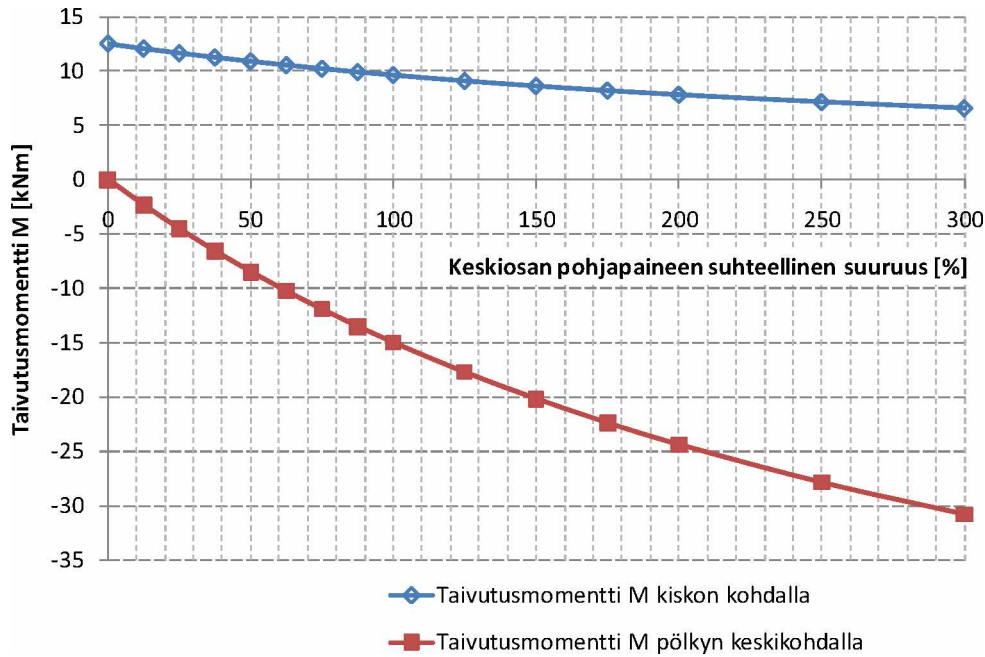
Ratapölkyn pituus	$L =$	2,6 m
Kuormituspisteiden väli	$L_c =$	1,6 m
Pyöräkuorma pölkyn päätä kohden	$P =$	100 kN

Pohjapaine oli vakio ratapölkyn päissä 1 m matkalla ja vakio myös keskiosalla 0,6 m matkalla kuvan 4.1 mukaan. Kun ratapölkyn keskiosan suhteellinen pohjapaine oli 100 % (kuva 4.5), oli kyseessä tasainen pohjapaine koko ratapölkyn alapinnalla.



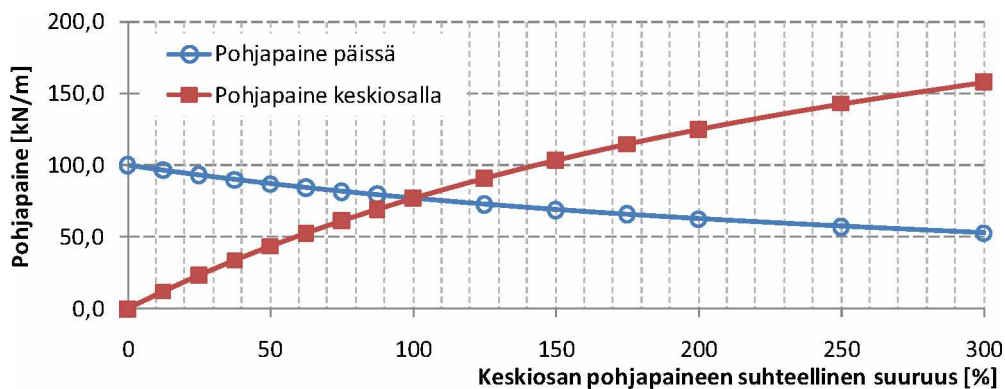
Kuva 4.1 Ratapölkyn oletettu pohjapainejakautuma. Tässä keskiosan pohjapaine on 64 % päiden pohjapaineesta.

Ratapölkyn keskiosan suhteellisen pohjapaineen vaihdellessa välillä 0... 300 % vaihteli taivutusmomentti kiskon kohdalla vastaavasti välillä 12,5... 6,6 kNm kuvan 4.2 mukaisesti. Taivutusmomentti ratapölkyn keskikohdalla, 1,3 m ratapölkyn päästä, vaihteli välillä 0... 30,8 kNm. Kun keskiosan suhteellinen pohjapaine oli 64 %, olivat negatiivinen ja positiivinen taivutusmomentti itseisarvoltaan yhtä suuret, $M = 10,5$ kNm.



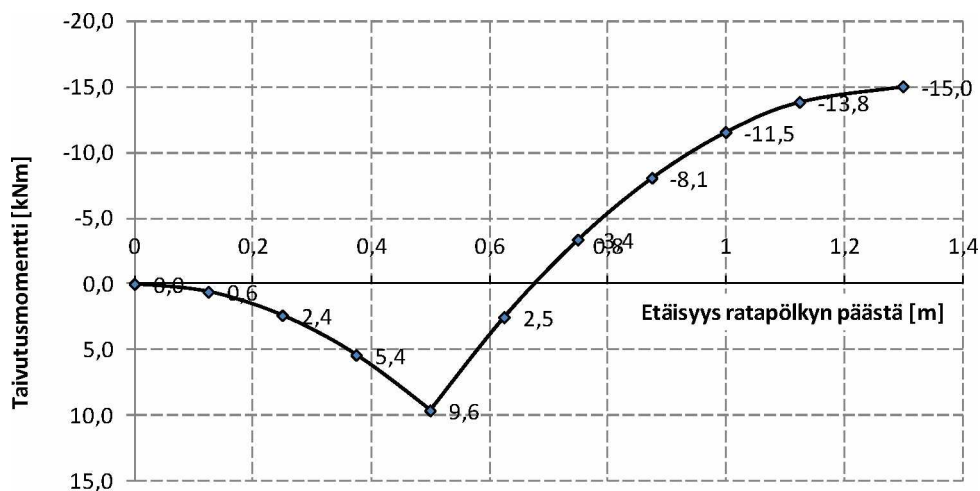
Kuva 4.2 Laskettu taivutusmomentti kiskon kohdalla ja ratapölkyn keskikohdalla vakiokuormalla pohjapaineen jakautuessa eri tavoin ratapölkyn päiden ja keskikohdan välillä.

Ratapölkyn keskiosan suhteellisen pohjapaineen vaihdellessa välillä 0... 300 % (kuva 4.3) vaihteli pohjapaineen arvo ratakiskon päässä välillä 100... 53 kN/m, ja keskiosan pohjapaine vastaavasti välillä 0... 158 kN/m.

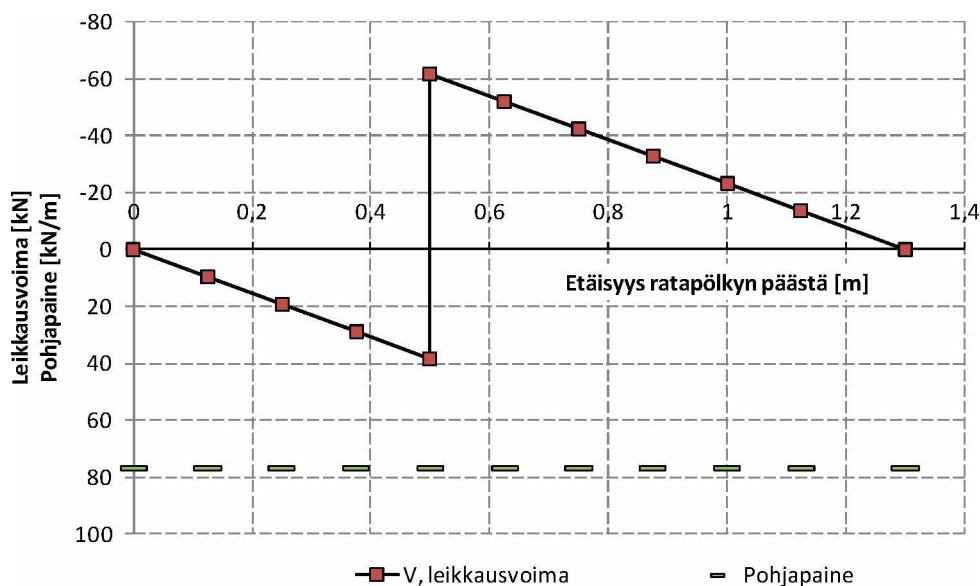


Kuva 4.3 Pohjapaine ratapölkyn päissä ja keskiosalla vakiokuormalla pohjapaineen jakautuessa eri tavoin ratapölkyn päiden ja keskikohdan välillä.

Tasaisella pohjapaineella ja 100 kN pyöräkuormalla 2,6 m pitkän ratapölkyn, jonka ulokemitta on 0,5 m, taivutusmomentti ratapölkyn päästä lukien on kuvan 4.4 mukainen. Pohjapaine on tällöin $100 \text{ kN} / (2,6 \text{ m} / 2) = 76,9 \text{ kN/m}$ ja maksimi leikkausvoima on 62 kN (kuva 4.5).

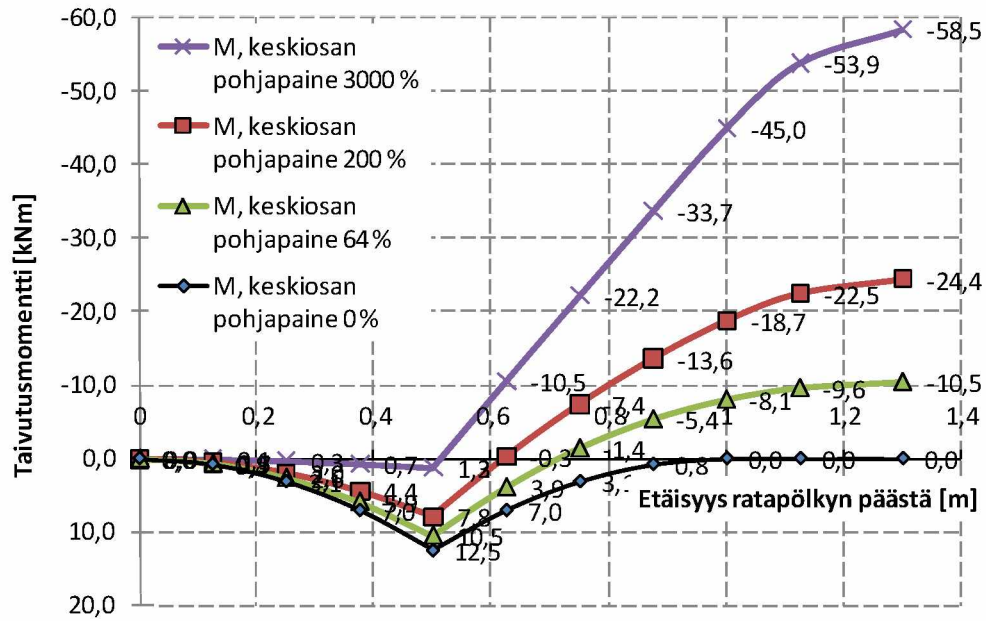


Kuva 4.4 Taivutusmomentti tasaisella pohjapaineella (keskiosan pohjapaineen suhteellinen suuruus on 100 %).



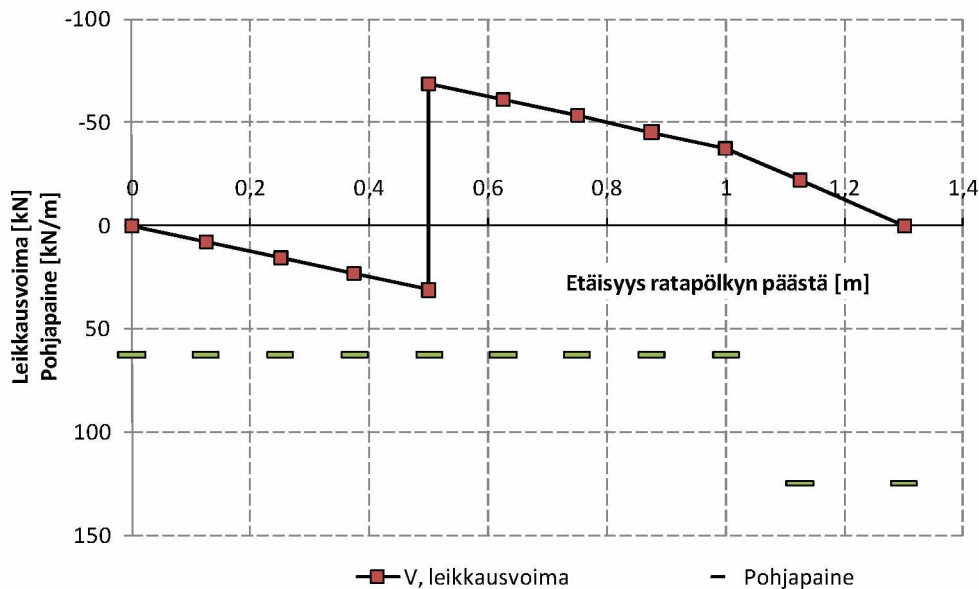
Kuva 4.5 Leikkausvoima tasaisella pohjapaineella.

Ratapölkyn taivutusmomentti ratapölkyn keskellä kasvaa selvästi keskiosan suhteellisen pohjapaineen kasvaessa kuvan 4.6 mukaisesti. Muutos kiskonkohdan (0,5 m päästä) momentissa on pienempi, erityisesti välillä 0... 200 %. Kun tuennasta on 90 % keskiosalla (ylin kuvaaja), on keskiosan taivutusmomentti monikymmenkertainen verrattuna kiskonkohdan taivutusmomenttiin.



Kuva 4.6 Taivutusmomentti, kun keskiosan pohjapaineen suhteellinen suuruus on 0 %, 64 %, 200 % tai 3000 %.

Leikkausvoiman derivaatta eli kuvaajan kulmakerroin on sama kuin pohjapaine kuvassa 4.7 esitetyllä tavalla. Taivutusmomentin derivaatta puolestaan on sama kuin leikkausvoima kyseisellä kohdalla.



Kuva 4.7 Leikkausvoima ja pohjapainejakautuma, kun keskiosan pohjapaineen suhteellinen suuruus on 200 %.

4.2 Ratapölkkyjen laskenta alustalukutarkastelun avulla

4.2.1 Laskennan periaatteet, käytetyt alustalukujakaumat ja alustalukujen arvot

Ratapölkyn BP99 puolikkaasta valittiin 8 erilaista poikkileikkauskohtaa 2D-FEM-laskennan kohteeksi. Kohdat sijaitsivat etäisyydellä 50, 150, 250, 400, 600, 775, 925 ja 1150 mm pölkyn päästä, kuten alustaluku-laskentatulokset kuvassa 4.8 esittävät. Poikkileikkausten jäyhyysmomentit I laskettiin halkeilemattomalle betonille ilman punosten vaikutusta. Taivutusjäykkyudet EI määritettiin betonin kimmokertoimen $E = 25000$ MPa mukaan eli käytettiin ns. varovaista arvoa. Ratapölkyn B97 muoto vastaa pääpiirteissään ratapölkyn BP99 muotoa esim. taulukon 2.8 mukaan.

Poikkileikkausten määrittelykohtiin lisättiin tuenta ratapölkyn alapintaan kimmoisten jousien avulla. Tarkastelu tehtiin siis Winklerin teorian perusteella, jolloin jousien avulla mallinnettiin alustaluku ratapölkyn tukemiseksi ja ratapölkyn käyttäytyminen vastasi palkin toimintaa kimmoisalla alustalla. Symmetria hyödynnettiin mallintamalla 2,6 m pitkän ratapölkyn keskikohtaan taivutusjäykä kiinnitys ilman pystytuenta. Alustaluku vaihteli eri kohdissa ratapölkyn alla laskentaan valituilla tuentatapauksilla 1... 5. Tarkasteluun valittiin 5 eri oletusta alustalukujakaumasta pölkyn alla (taulukko 4.2) ja kullakin jakaumalla 3-4 eri alustalukua (taulukko 4.3).

Alustalukujakautumat valittiin kenttätutkimuksissa (kohta 3.4) havaittujen pohjapainejakautumien mukaan. Alustalukujen suuruus valittiin kentällä mitattujen painumien mukaan huomioiden painumien suuri vaihtelu esim. vuodenajan mukaan. Laskennat toteutettiin Comsol Multiphysics 4.2 -ohjelmistolla.

Taulukko 4.2 Tutkitut tuentatapaukset.

Tuenta 1	Vakioalustaluku koko ratapölkyn matkalla
Tuenta 2	Vakioalustaluku 1 m matkalla pölkyn päästä lukien, keskikohdalla ei pystytukea
Tuenta 3	Vakioalustaluku 1 m matkalla pölkyn päästä lukien, keskellä tästä 64 %
Tuenta 4	Vakioalustaluku keskellä. Ulokkeen alla 3-kertainen ja kiskon vieressä 1,5-kertainen alustaluku
Tuenta 5	Vakioalustaluku keskellä ja ulokkeen alla. Kiskon vieressä, raiteen keskikohdan puolella 5- ja 8-kertainen alustaluku

Taulukko 4.3 Alustaluku [MN/m/m] eri kohdissa ratapölkyn alla pölkyn päästä lukien.

	Uloke 500 mm	Kiskon vieri 200 mm	Seuraava 150 mm	Seuraava 150 mm	Keskellä 300 mm
Tuenta 1	250	250	250	250	250
Tuenta 1	100	100	100	100	100
Tuenta 1	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Tuenta 1	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
Tuenta 2	250	250	250	250	0
Tuenta 2	100	100	100	100	0
Tuenta 2	33,3	33,3	33,3	33,3	0
Tuenta 2	16,7	16,7	16,7	16,7	0
Tuenta 3	250	250	250	250	160
Tuenta 3	100	100	100	100	64
Tuenta 3	33,3	33,3	33,3	33,3	21,3
Tuenta 3	16,7	16,7	16,7	16,7	10,7
Tuenta 4	300	150	100	100	100
Tuenta 4	100	50	33,3	33,3	33,3
Tuenta 4	50	25	16,7	16,7	16,7
Tuenta 5	100	500	800	100	100
Tuenta 5	33	167	266	33	33
Tuenta 5	17	84	134	17	17

Jousien jäykkyydet määritettiin kenttäkokeissa mitattujen ratapölkkyjen päiden palautuvien painumien mukaan. Jäykin tuenta vastasi karkeasti jäätyneen ratapenkeeseen jäykkyyttä ja löysin tuenta vastasi ratapenkereiden jäykkyyttä joustavimmissa mitatuissa kohteissa. Tuennoissa 1... 3 suurin alustaluku oli 15-kertainen pienimpään verrattuna.

Käytetty vakiokuorma voidaan määrittää akselipainosta 250 kN seuraavasti sysäyskerroin 1,6 huomioiden: $1,6 \cdot 250 \text{ kN} / (2 \cdot 2) = 100 \text{ kN}$. Oletuksena oli täten 200 kN pyöräkuorma, josta 50 % kohdistui tarkasteltavalle ratapölkylle. Vakiokuorma kiskon kohdalla oli siis 100 kN.

Laskennan keskeisimmät yksinkertaistukset olivat:

- Ratapenkereen jäykkyyden muutosten ei oletettu vaikuttavan siihen, miten kisko jakaa pyöräkuorman peräkkäisten pölkkyjen kesken.
- Tarkastelu oli 2D-FEM-laskenta, jolloin esimerkiksi tarkasteltavan ratapölkyn pohjapaineen ei ajateltu jakaantuvan viereisten pölkkyjen alle ja lisäävän pysytännityksiä viereisten ratapölkkyjen alapuolisissa maakerroksissa.
- Ratapenkereen reunan ei katsottu muodostavan epäjatkuvuuskohtaa eli pienempää pystyjäykkyyttä ja pohjapainetta.
- Betoni oli halkeilematon ja raudoittamaton.

Alustalukulaskennan tuloksia voi vertailla esimerkiksi alustalukujakautumia vastaavilla pohjapainejakautumilla laskettujen taivutusmomenttien arvoihin. Pohjapainelaskennan (kohta 4.1) tulokset on lisätty alustalukulaskennan tukireaktio- ja taivutusmomenttikuvaajiin.

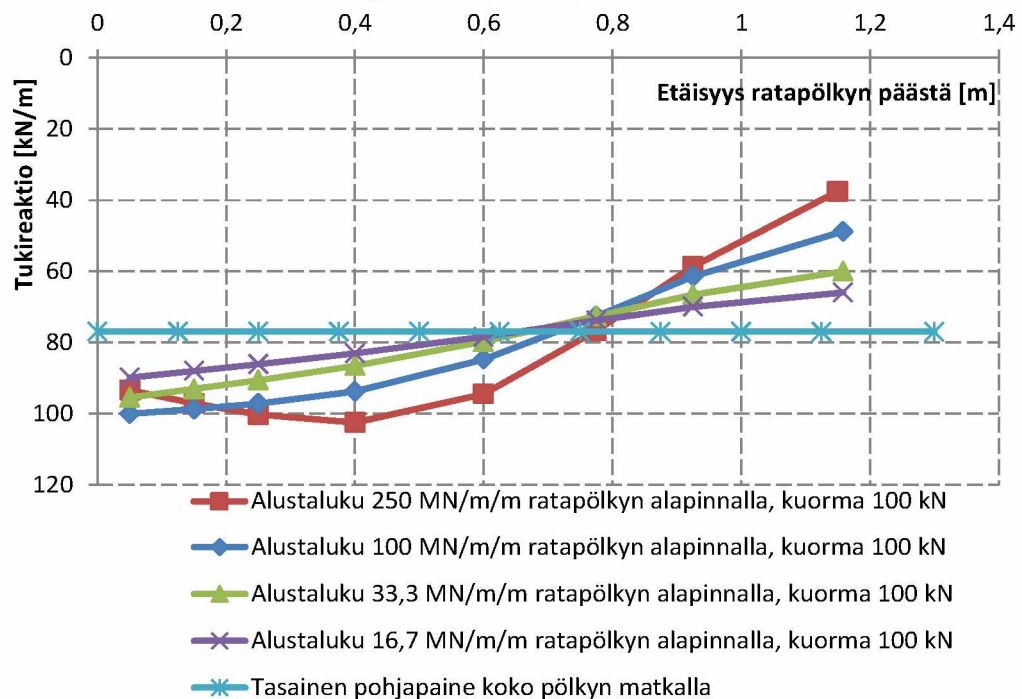
Karkeasti voidaan arvioida, että teräsbetonirakenteessa taivutusjäykkyys pienenee neljännesosaan ensimmäisen halkeaman seurauksena. Tätä periaatetta on kohdassa 4.2.2.6 sovellettu esijännitettyyn ratapölkkyyn mallintamalla jäykkyys 75 % pienentyneeksi kiskon kohdalla 100 mm pituudella (etäisyys 500... 600 mm päästä) ja ratapölkyn keskellä 150 mm pituudella (etäisyys 1150... 1300 mm päästä).

Laskettu tukireaktio [kN/m] vaikuttaa tyypillisesti koko 1,3 m matkalla. Alustalukutarkastelu toteutettiin tässä jousien avulla. Tukireaktio-kuvaajissa esitetään jousien sijainnit ja tukireaktiot jousien kohdissa sekä lineaarinen arvio jousien välissä.

4.2.2 Tulokset

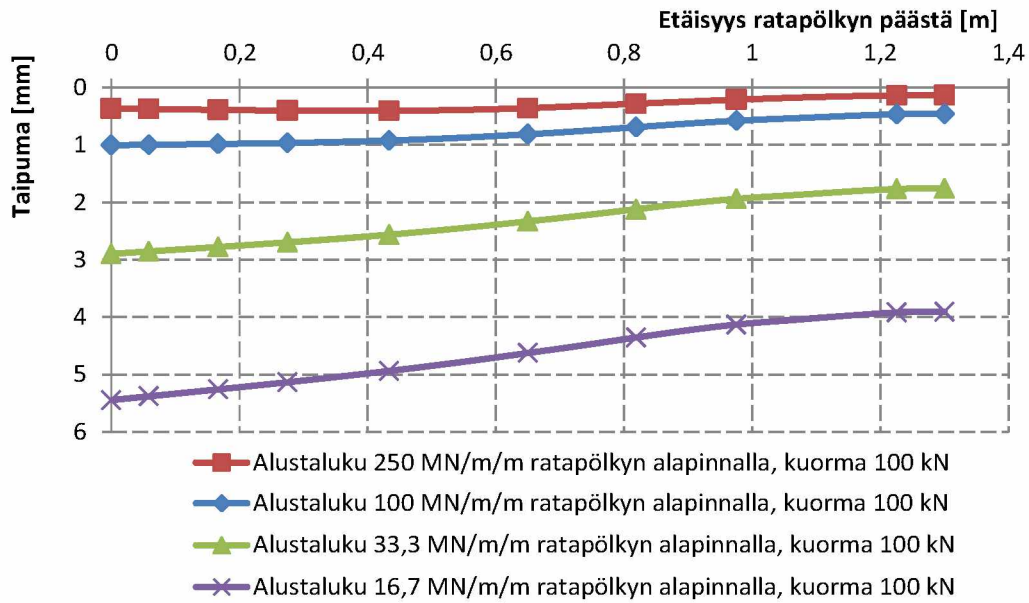
4.2.2.1 Tuentatapaus 1

Suurella alustaluvulla tuenta keskittyi kuormituksen eli kiskon kohdalle (kuva 4.8). Heikoin tuenta vastasi vakiopohjapainetapausta parhaiten.

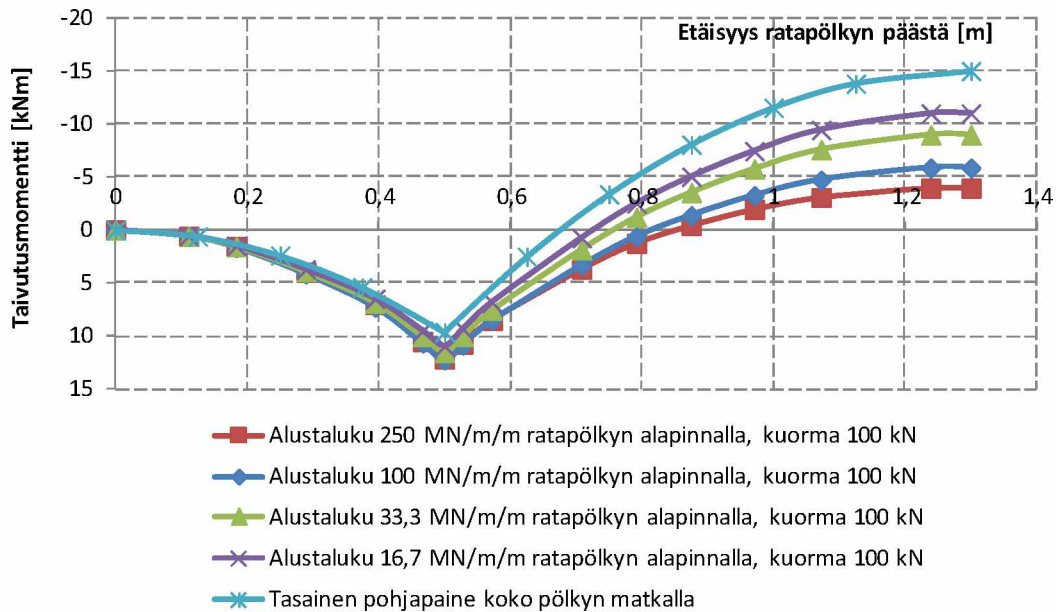


Kuva 4.8 Tukireaktio jousien kohdilla, tuentatapaus 1.

Taipumamuoto kuvaa ratapölkyn palautuvaa painumaa (kuva 4.9). Ratapölkyn pään ja keskikohdan taipumien suhde $w_{\text{kesk}}/w_{\text{pää}}$ vaihteli selvästi. Jäykällä tuennalla suhde oli pienempi kuin löysällä. Myös tästä, samoin kuin taivutusmomenttijakautumista (kuva 4.10), voi päätellä tuennan keskittyvän kiskojen kohdille jäykällä penkereellä. Taivutusmomenttien muuttuminen alustaluvun vaihdellessa on selvästi suurempaa ratapölkyn keskellä kuin kiskon kohdalla. Keskellä pelkkä alustaluvun pienentyminen kasvattaa taivutusmomentin miltei kolminkertaiseksi.



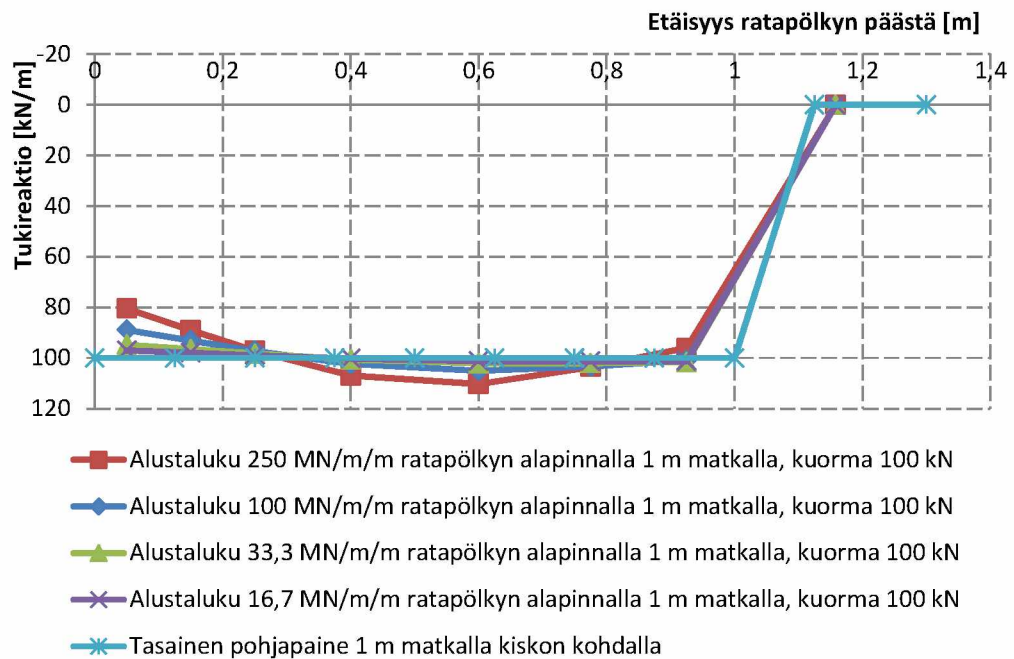
Kuva 4.9 Ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 1.



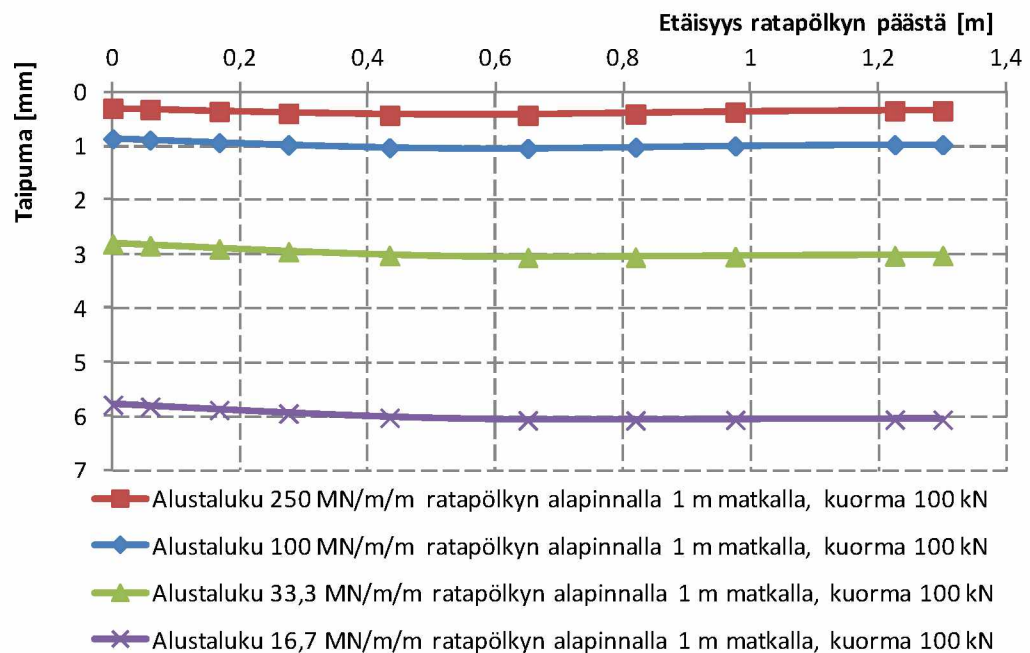
Kuva 4.10 Ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 1.

4.2.2.2 Tuentatapaus 2

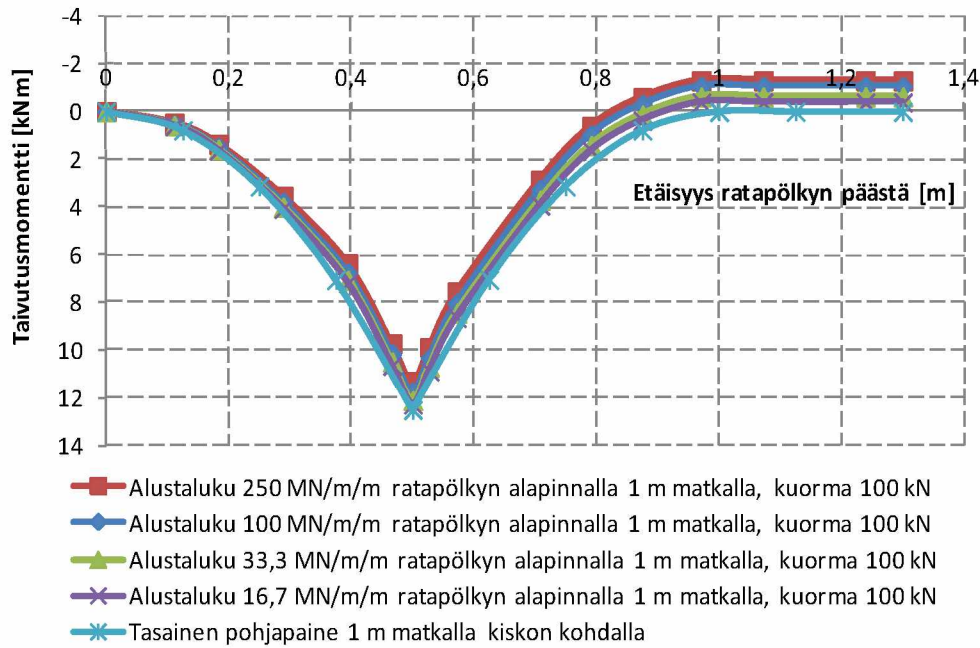
Tuentatapaus 2 vastaa raiteen tuennan avulla tavoiteltavaa alustaluku- tai pohjapainejakautumaa. Tapauksessa 2 jäykkyyserot eivät yhtä selvästi vaikuta tukireaktioiden (kuva 4.11) ja taivutusmomentin (kuva 4.13) arvoihin kuin tapauksessa 1, jossa pohjapaine (alustaluku) vaikutti koko pölkyn matkalla. Jäykkyyserot näkyvät lähinnä painumien suuruudessa kuvan 4.12 mukaisesti. Ratapölkky painuu melko suorana, koska suurin taivutusmomentti vaikuttaa melko lyhyellä matkalla kiskon kohdalla ja kiskon kohdalla pölkyn taivutusjäykkyys on suurimmillaan.



Kuva 4.11 Tukireaktio jousien kohdilla, tuentatapaus 2



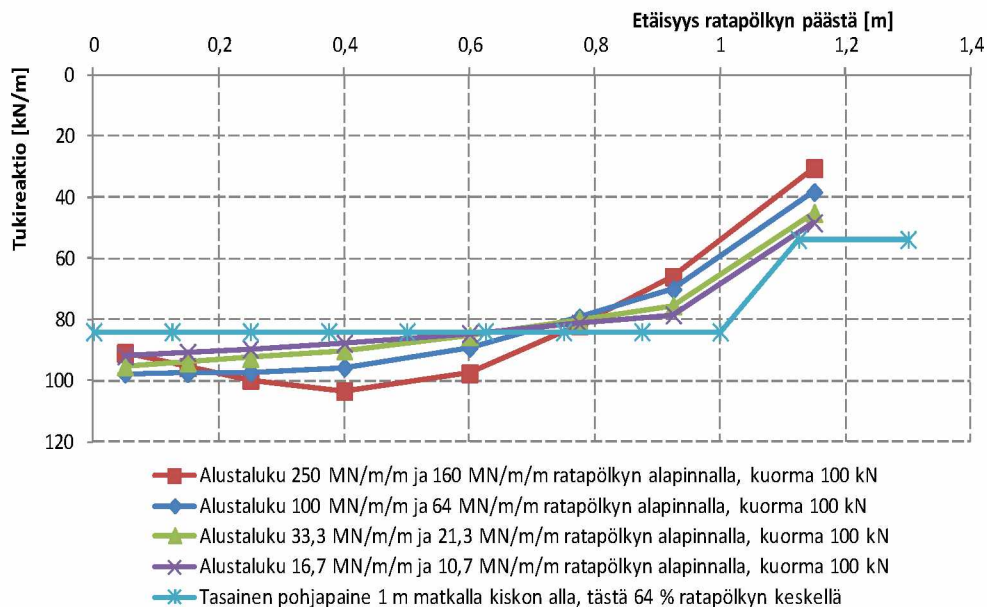
Kuva 4.12 Ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 2.



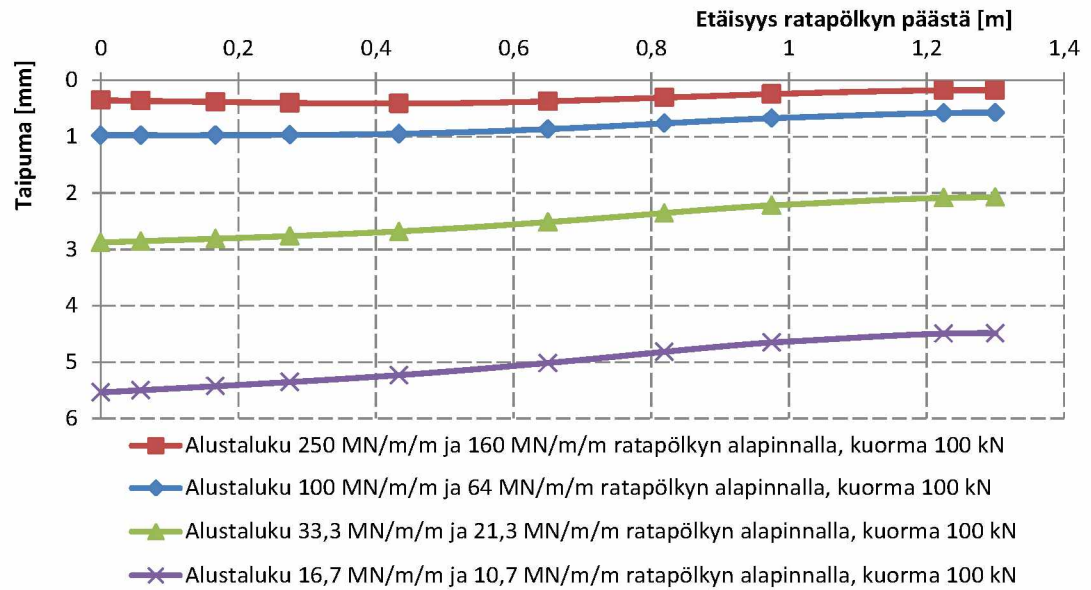
Kuva 4.13 Ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 2.

4.2.2.3 Tuentatapaus 3

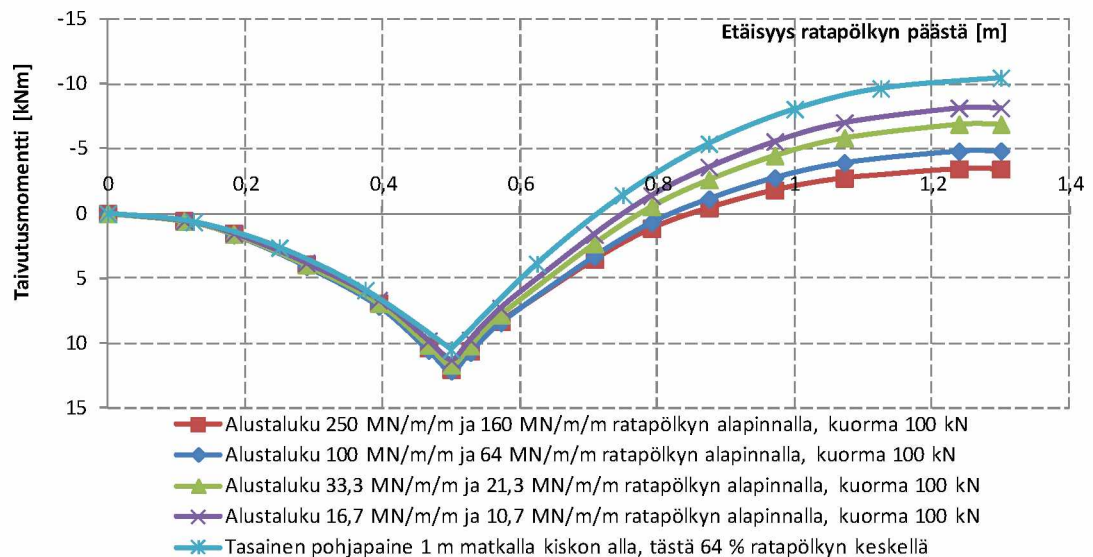
Tuentatapaus 3 valittiin tarkasteluun siksi, että pohjapaineen (kuva 4.14) vaihdellessa tapauksen mukaisesti syntyy ratapölkyn keskelle itseisarvoltaan samansuuruinen taivutusmomentti 10,5 kNm kuin kiskon kohdalle (kuva 4.16). Taipumamuoto (kuva 4.15) on hieman suurempi kuin tapauksessa 1.



Kuva 4.14 Tukireaktio jousien kohdilla, tuentatapaus 3.



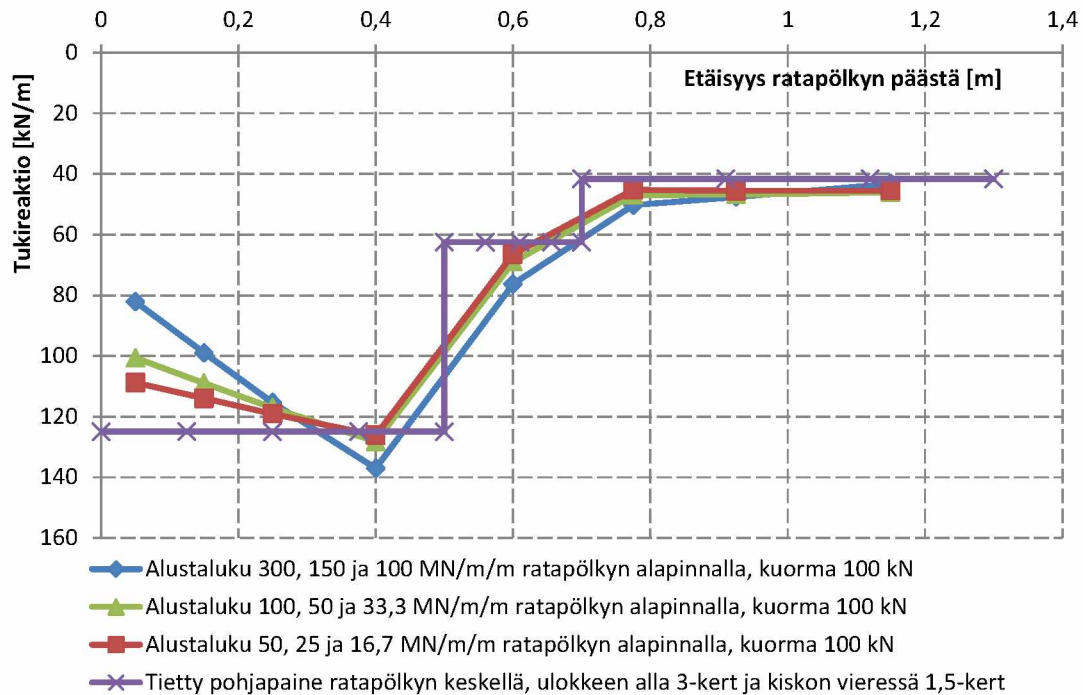
Kuva 4.15 Ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 3.



Kuva 4.16 Ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 3.

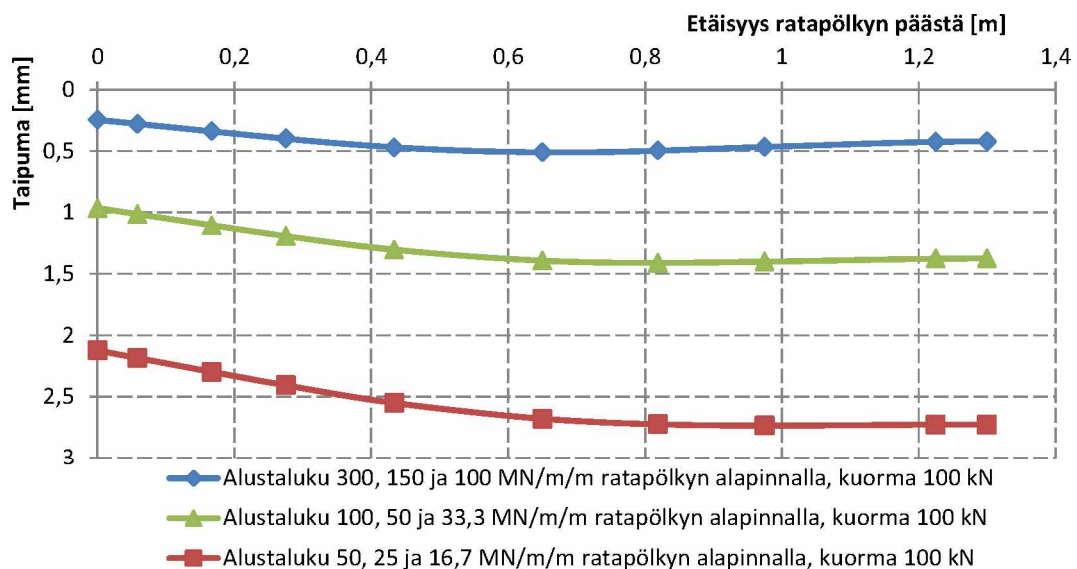
4.2.2.4 Tuentatapaus 4

Tuentatapaus 4 vastaa kenttäkokeiden havaintoa tilanteesta, jossa pohjapaine (kuva 4.17) on keskittynyt pääasiassa ulokkeen alle. Kuormasta noin 60 % siirtyi ratapenkeeseen ulokkeen pohjan kautta. Joustava pengeri vastasi parhaiten tutkitun alustalukajakautuman mukaista pohjapainejakautumaa.



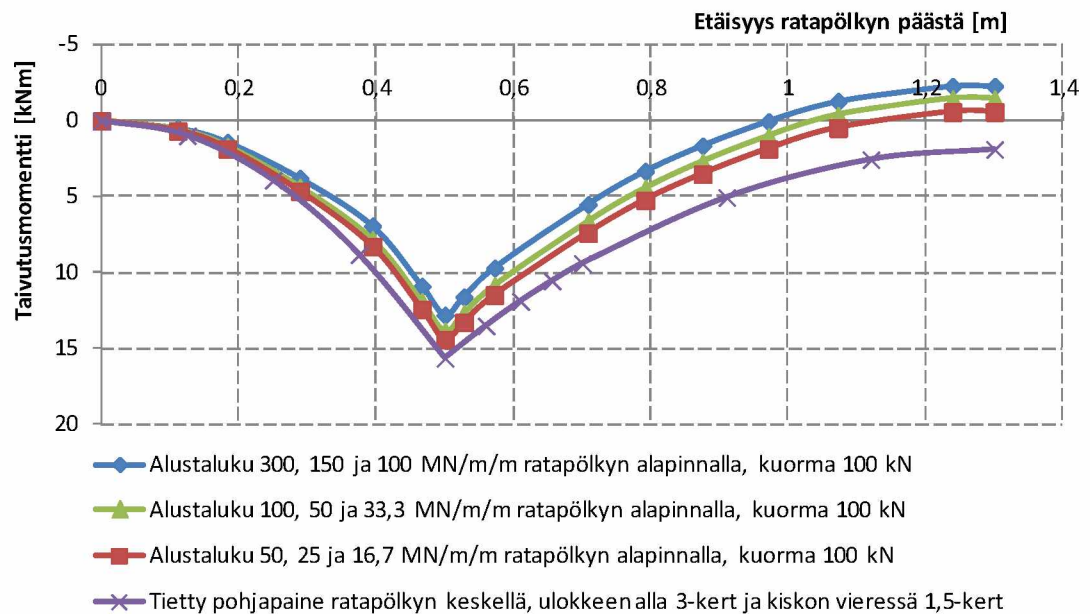
Kuva 4.17 Tukireaktio jousien kohdilla, tuentatapaus 4.

Tapausten 4 taipumamuoto (kuva 4.18) poikkeaa selvästi muiden tapausten taipumamuodoista, koska tässä tapauksessa ulokkeen taipuma jää selvästi kiskon kohdan ja keskikohdan taipumaa pienemmäksi.



Kuva 4.18 Ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 4.

Tuentatapaus 4 aiheuttaa suurimman taivutuksen (kuva 4.19) kiskon kohdalle sekä alustaluvuilla että pohjapainejakautumalla tuettuna.



Kuva 4.19 Ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 4.

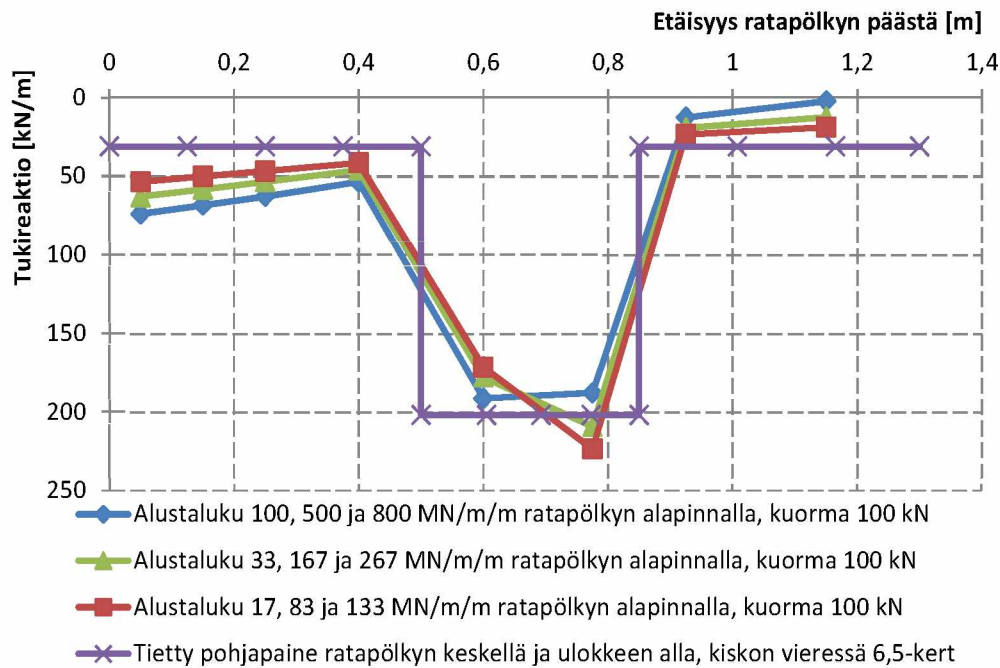
Erityistapauksia:

Kohdan 4.2.1 taulukoiden esittämien perustapausten lisäksi laskettiin positiivisen taivutusmomentin ääriarvon etsimiseksi muutamia tuentatapausten 4 muunnelmia:

- Erityistapaus, jossa oli muita alueita korkeampi alustaluku (kolminkertainen eli $3 \cdot 16,7 = 50$ MN/m/m) pelkästään ulokkeen alla, saatiin taivutusmomentiksi 15 kNm kiskon kohdalla.
- Erityistapauksessa, jossa vielä suurempi alustaluku (kuusinkertainen eli $6 \cdot 16,7 = 100$ MN/m/m) oli pelkästään ulokkeen alla, saatiin taivutusmomentiksi 16 kNm kiskon kohdalla ja keskialueella noin 4 kNm. Ratapölkyn keskellä oli siis alapinnalle vetojännityksen aikaansaava taivutusrasitus.
- Kun alustaluku (100 MN/m/m) vaikutti pelkästään ulokkeen alla, saatiin taivutusmomentiksi 20 kNm keskialueella 1,6 m matkalla. Tällainen tuenta ei ole kenttämittausten mukaan todennäköinen.

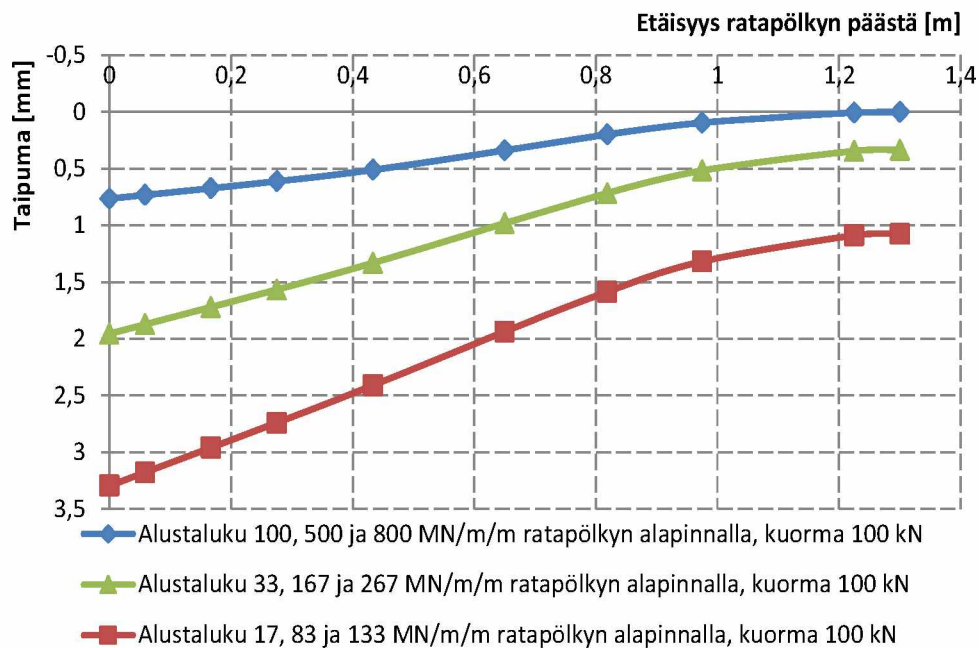
4.2.2.5 Tuentatapaus 5

Tapaus 5 vastaa tyypillistä kenttäkokeissa havaittua alustaluku- ja pohjapainejakautumaa (kuva 4.20). Tässä tapauksessa alustalukutarkastelu tuotti paremmin mittaus-tuloksia vastaavan tukireaktiojakautuman kuin pohjapainetarkastelu.



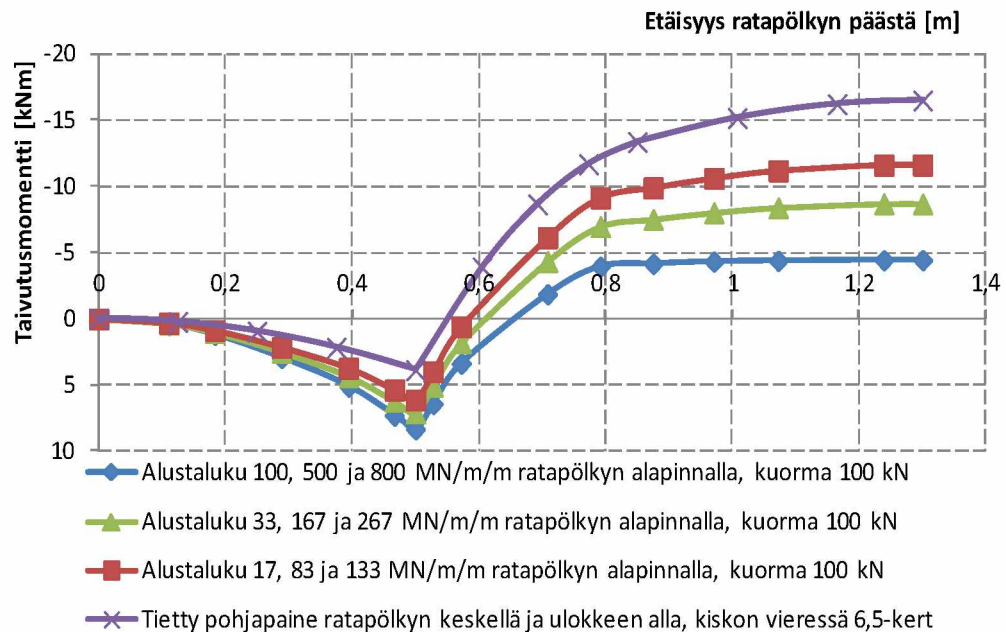
Kuva 4.20 Tukireaktio jousien kohdilla, tuentatapaus 5.

Pölkyn pään ja keskikohdan väliset taipumaerot (kuva 4.21) olivat suurimmat muihin tuentatapauksiin verrattuna.



Kuva 4.21 Ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 5.

Taipumamuotojen (kuva 4.22) mukaisesti myös keskikohdan taivutusmomentti on suurin muihin tuentatapauksiin verrattuna. Penkereen jäykkyyden pienentyessä kasvoi keskikohdan taivutusmomentti moninkertaiseksi.



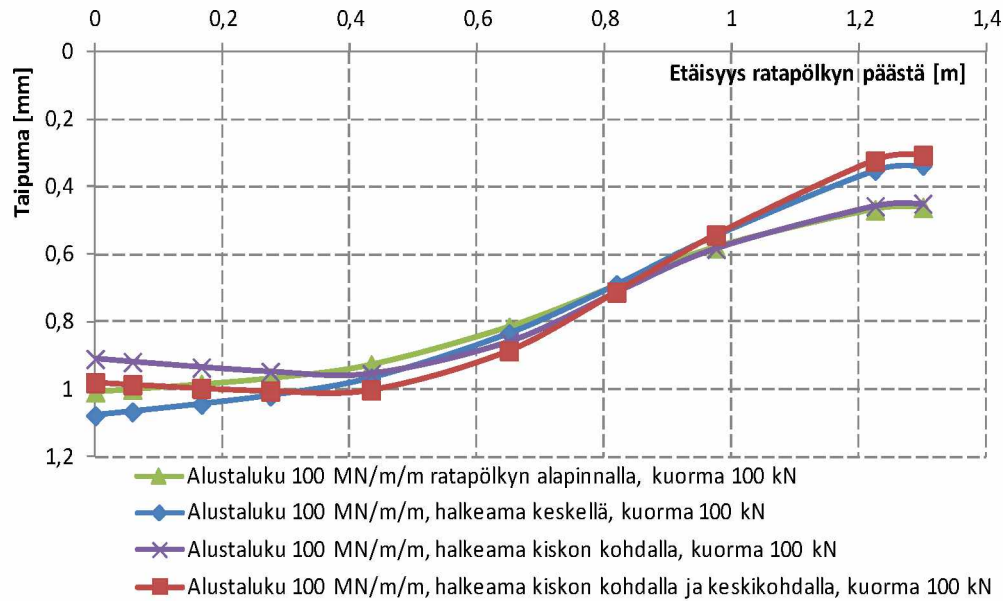
Kuva 4.22 Ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 5.

4.2.2.6 Erityistapaus: halkeillut ratapölkky

Ratapölkyn taivutusjäykkyys pienenee ja taipuminen lisääntyy halkeilun myötä. Taivutusjäykkyyden pieneminen johtaa kuvan 4.23 mukaisesti kiskon kohdan palautuvan painuman maltilliseen kasvuun ratapenkereen ollessa jäykkä. Kiskon kohdan ja keskikohdan halkeilulla on yhtä suuri kiskon kohdan palautuvaa painumaa lisäävä vaikutus.

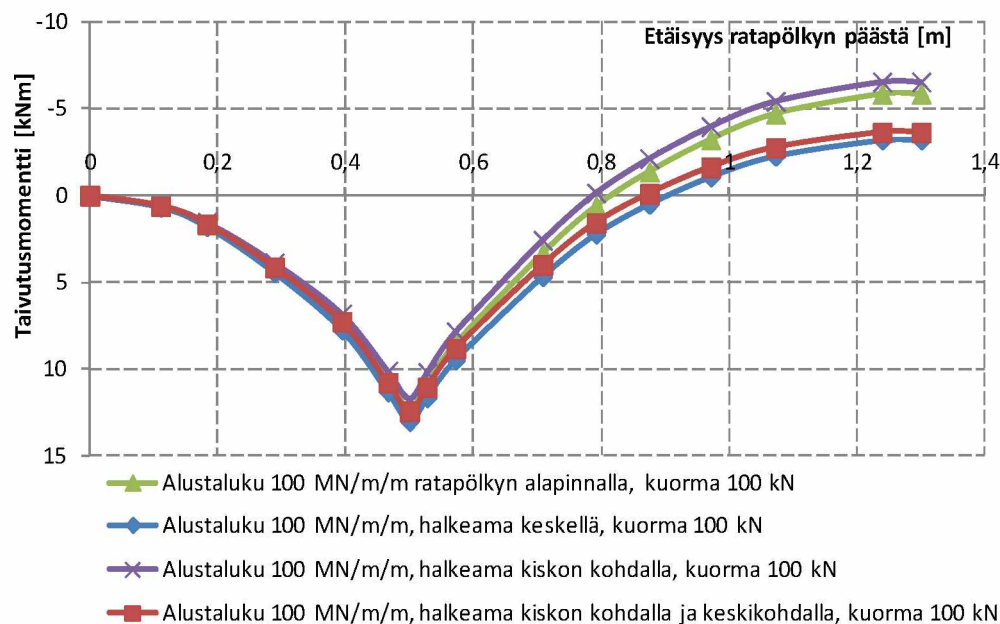
Keskikohdan palautuva painuma pienenee luvussa 4.2.1 esitettyjä oletuksia käytettäessä keskikohdan halkeilun seurauksena yli 30 %. Tämä on myönteinen ilmiö, koska seurauksena on myös tukireaktion pieneminen raiteen keskellä.

Kuusi kertaa pienemmällä alustaluvulla (17 MN/m/m) keskikohdan halkeilu lisäsi kiskon kohdan palautuvaa painumaa noin 5 % ja pienensi pölkyn keskikohdan palautuvaa painumaa noin 16 %. Halkeilun vaikutus siis korostui jäykällä penkereellä.



Kuva 4.23 Halkeilleen ratapölkyn taipuma, tuentatapaus 1.

Keskikohdan halkeilu näkyy vielä selvemmin taivutusmomenttikäyttäytymisessä. Keskikohdan taivutusmomentti kuvan 4.24 mukaan lähes puolittuu. Kuormituskohdan taivutusmomentti kasvaa kiskon kohdan halkeillessa vain vähän.



Kuva 4.24 Halkeilleen ratapölkyn taivutusmomentti, tuentatapaus 1.

4.2.3 Kiskon kohdan kallistuminen ja raidelevyden muutokset

Koska alustalukulaskelmissa mallinnettiin ratapölkky sen todellisten poikkileikkausmittojen mukaan ja eri tuentatapauksilla laskettiin ratapölkyn taipumamuoto, voitiin tuloksista määrittää myös raidelevyden muutokset eri tuentatapauksille. Jotta saatiin maksimiarvot selville, tarkasteltiin tuentatapauksia 1, 4 ja 5, jokaista kahdella eri kiskon kohdan painumalla, ja keskeltä yläpinnastaan haljennutta ratapölkkyä tuennalla 1. Kiskon kallistuminen laskettiin 217 mm pituudella ja kiskon UIC60 korkeus las-

kelmissä oli 172 mm. Raideleveys mitataan 14 mm kiskon selästä alaspäin. Tämä huomioitiin tarkastelukorkeuden määrittämisessä, samoin kuin 118 mm etäisyys ratapölkyn neutraaliakselilta pölkyn yläpintaan. Taulukossa 4.4 esitetty pölkyn taipuman aiheuttama kiskon kuormituksen aikainen yläpinnan vaakaliike Δv vaihteli välillä -0,2... +0,6 mm, jolloin raideleveyden muutos oli -0,3... +1,2 mm.

Taulukko 4.4 Lasketut kiskon kohdan kaltevuusmuutokset ja raideleveyden muutokset.

	Kiskon kohdan painuma [mm]	Kiskon pystyliikero Δy [mm]	Kaltevuusmuutos [aste]	Kiskon hamaran vaakaliike Δv [mm]	Raideleveyden muutos $2 \cdot \Delta v$ [mm]
Tuentatapaus 1	4,8	0,32	0,0833	0,40	0,80
Tuentatapaus 1	0,9	0,11	0,0296	0,14	0,29
Tuentatapaus 4	2,6	-0,13	-0,0341	-0,16	-0,33
Tuentatapaus 4	1,3	-0,09	-0,0236	-0,11	-0,23
Tuentatapaus 5	2,2	0,47	0,1253	0,60	1,21
Tuentatapaus 5	1,2	0,35	0,0925	0,45	0,89
Haljennut pölkky, tuenta 1	0,9	0,13	0,0349	0,17	0,34

Pölkyn halkeaminen isolla alustaluvulla laskettuna (kiskon kohdan painuma 0,9 mm) tuentatapauksessa 1 kasvatti raideleveysmuutosta vain 0,05 mm. Ratapenkereen jäykkyyden vaikutus raideleveyden muutokseen oli huomattavasti tätä suurempi.

4.2.4 Mittausten mukaiset ratapölkyn tuennat

Tutkimustyössä etsittiin myös ratapölkkyjen mitattuja taipumia vastaavia luvun 3.4 mukaisia laskennallisia taipumamuotoja ja näitä taipumamuotoja vastaavia tuentatapauksia. TTY:n TERA-tutkimushankkeen toisessa osiossa on kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitattu palautuvia painumia useilla rataosuuksilla (Peltokangas et al 2013). Mitatuista painumista arvioitiin kyseisten ratapölkkyjen taipumamuodot, joita verrattiin tuentatapauksilla 1 – 5 laskettuihin painumiin. Parhaiten mitattuja painumia vastaava tuentatapaus valittiin, vaikka aivan täsmällistä vastaavuutta ei kaikissa tapauksissa löytynyt.

Taulukossa 4.5 esitetään painumamittauksia vastaavat tuentatapaukset yksittäisistä ratapölkkyistä jäätäneessä penkereessä mitattuina. Rataosuuksilla Airaksela-Kurkimäki ja Kesälahti-Puhos on taulukkoon laskettu neljän ratapölkyn keskiarvopainuma.

Taulukko 4.5 Talvella mitattuja ratapölkyn pään ja keskikohdan painumia ja niiden mukaan arvioitua tuentatapauksia.

Rataosuus, päivämäärä ja veturi-tyyppi	Airakse-la-Kurki-mäki 8.2.2012 Sm3 & Sr1	Kesälah-ti-Puhos 9.2.2012 IC Sr1	Kives-järvi-Palta-mo 7.2.2012 2 Sr1	Mänt-sälä-Sipilä 28.2.2012 12 Flirt Sm5	Mäntsä-lä-Sipilä 28.2.2012 2 Flirt Sm5	Mäntsä-lä-Sipilä 28.2.2012 2 Flirt Sm5	Mäntsä-lä-Sipilä 28.2.2012 2 Flirt Sm5
Pään painuma [mm]	0,3	0,3	0,8	0,6	0,2	0,35	0,15
Keskikohdan painuma [mm]	0,1	0,2	1,3	0,2	0,1	0,1	0,3
Vastaava tuentatapa numero / Taulukko 4.2	5	3	4	5	1	5	4

Rataosuuden Mäntsälä-Sipilä neljän peräkkäisen ratapölkyn tuenta vaihteli selvästi. Sama ilmiö oli havaittavissa monella muullakin rataosuudella. Esitetyt viisi erilaista tuentatapausta kuitenkin kattoivat ratapölkyn painumia vastaavien taipumien mukaiset ratapölkyn tuentavaihtelut.

4.2.5 Yhteenveto

Betonisten ratapölkkyjen tuennan alustalukulaskennalla arvioitiin useiden eri alustalukujakaumien ja tuennan jäykkyyksien avulla tukireaktioita ratapölkyn alapinnalla, taipumamuotoja ja taivutusmomentteja kiskon kohdan vakiokuormalla 100 kN. Tuloksista tehtiin seuraavat päätelmät:

- Jäykällä ratapenkereellä tuenta keskittyy kiskojen kohdille
- Tasaisella alustaluvulla penkereen jäykkyyden pienentyessä taivutusmomentti kasvaa selvästi enemmän keskikohdalla kuin mitä se kiskon kohdalla pienenee.
- Tuennan keskittyessä ratapölkyn päihin 1 m matkalla ratapenkereen jäykkyyden muutokset vaikuttavat vain hieman pölkyn rasiin ja tukireaktiojakaumaan.
- Tuennan keskittyessä ulokkeen alle syntyy ratapölkkyyn kiskon kohdalle suuri taivutusrasitus.
- Alustalukujakautumia vaihtelemalla oli mahdollista löytää kenttätutkimustuloksia vastaavat taivutusmomentit. Lisätietona saatiin todennäköinen ratapölkyn taipumamuoto junan ollessa tutkittavan ratapölkyn kohdalla.
- Myös halkeilun merkitystä tutkittiin laskennallisesti pienentämällä ratapölkyn taivutusjäykkyyttä kiskon kohdalla ja keskellä neljäsosaan ehjän poikkileikkauksen taivutusjäykkyydestä. Halkeilun vaikutukset ovat tuennan jakautumisen suhteen myönteiset, koska keskikohdalla sekä painuma että tukireaktio pienenevät. Vielä enemmän pieneni keskikohdan taivutusmomentti, joka lähes puolittui. Kiskon kohdalla taipuma ja ratapölkyn rasitukset kasvoivat

halkeilun seurauksena vain vähän. Halkeilun vaikutus korostui jäykällä penkereellä.

- Tuennan keskittyessä kiskon viereen oli keskikohdan taivutusmomentin herkkyys penkereen jäykkyyden muutoksiin suurinta. Penkereen jäykkyyden pienentyessä kasvoi keskikohdan taivutusmomentti moninkertaiseksi.
- Kuormituksenaikainen laskennallinen raidelevyden muutos ratapölkyn taipuessa oli $-0,3 \dots +1,2$ mm.
- Tuentatapaus 2 on edullinen ratapölkyn rakenteellisen toiminnan kannalta. Kun radassa olevaan ratapölkkyyn kohdistuu tasainen pohjapaine noin 1 m matkalle kiskoja kohdalla, ei 2,6 m pitkän ratapölkyn keskelle synny taivutusrasitusta lainkaan. Lisäksi ratapölkyn korkeus on suurimmillaan kohdassa, johon syntyy suurin taivutusmomentti, ja suurin taivutusmomentti on pienempi kuin esimerkiksi tuentatapauksessa 4.

Oletetun alustalukujakauman ja betonin vetolujuuden mukainen laskelma halkeamaan johtavan akselipainon suuruudesta on esitetty liitteessä 2. Laskennassa käytettyillä oletuksilla tulokseksi saatiin 275 kN.

4.3 Ehdotus uusien ratapölkkyjen suunnitteluohjeeksi alustalukutarkastelun avulla

4.3.1 Laskennan periaatteet

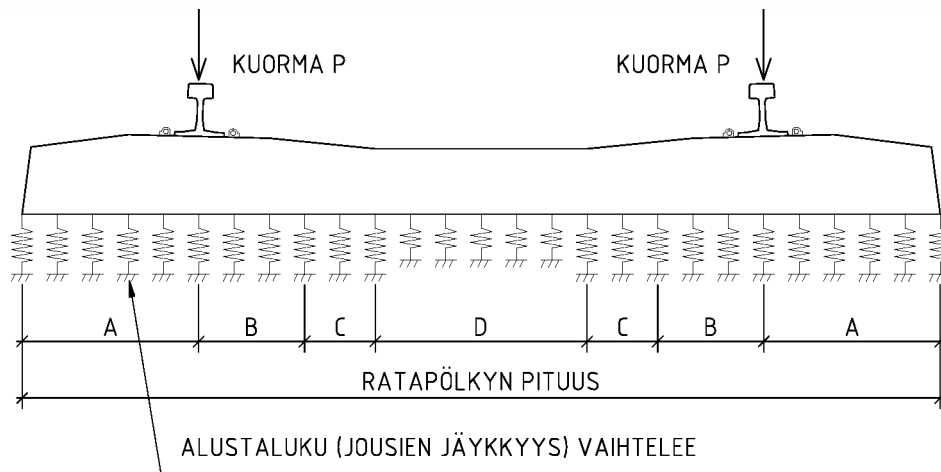
Kuorman P (kiskon kohta) ominaisarvon minimi on 100 kN, sisältäen dynaamisen vaikutuksen. Oletus: ei sisällä merkittäviä lovipyöristä johtuvia iskuja. Tilaaja määrittää tarkan arvon rataosuuskohtaisesti.

Ratapölkyn ajatellaan tukeutuvan ratapenkereeseen kuvan 4.25 ja kohdan 4.3.2 taulukoiden alustalukujakaumien 1-8 mukaisesti. Ratapölkyn rasitukset määritetään ja mitoitus suoritetaan erikseen jokaisen jakauman mukaan.

Käyttörajatilassa vetojännitys ei saa ylittää vetolujuuden $f_{ctk,0,05}$ arvoa (betonin ollessa K60-1 eli C50/60 on $f_{ctk,0,05} = 2,9$ MPa). Taipumaa ei rajoiteta.

Murtorajatilamitoituksessa kuorman osavarmuusluku on 2. Betonin ja teräksen osavarmuusluvut ovat suomalaisen betonirakenteiden eurokoodin EN1992-1-1 mukaiset. Mitoitus taivutukselle ja leikkaukselle murtorajatilassa tehdään em. eurokoodin periaatteiden mukaisesti. Rakenteen pitää kestää kuormituksen ja eri tuentojen aiheuttamat rasitukset.

Junan lähestyessä tarkasteltavaa ratapölkkyä nostavat taipuisat kiskot pölkkyä ylöspäin. Mitoitus nostolle tehdään siten, että alaspäin suuntautuva voima on 30-kertainen pölkyn oma paino. Vastaava voima ylöspäin (tuenta) sijaitsee kiskoja kohdalla. Suoritetaan käyttörajatilan mukainen vetojännitystarkastelu.



Kuva 4.25 Kirjainsymbolit alustalukujakautumien määrittämistä varten.

4.3.2 Tarkasteltavat alustalukujakaumat

Tarkasteltava tapaus 1: Vakioalustaluku koko ratapölkyn matkalla

Tarkasteltava kohta	Uloke A	Kiskon vieri B	Seuraava C	Keskellä D
Pituus [mm]	500	200	300	600
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 1	250	250	250	250
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 2	17	17	17	17

Tarkasteltava tapaus 2: Vakioalustaluku 1 m matkalla pölkyn päästä lukien, keskikohta tukematon

Tarkasteltava kohta	Uloke A	Kiskon vieri B	Seuraava C	Keskellä D
Pituus [mm]	500	200	300	600
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 3	250	250	250	0
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 4	17	17	17	0

Tarkasteltava tapaus 3: Vakioalustaluku keskellä, ulokkeen alla 3-kertainen

Tarkasteltava kohta	Uloke A	Kiskon vieri B	Seuraava C	Keskellä D
Pituus [mm]	500	200	300	600
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 5	450	150	150	150
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 6	50	17	17	17

Tarkasteltava tapaus 4: Vakioalustaluku keskellä ja ulokkeen alla, kiskon vieressä 5- ja 8-kertainen

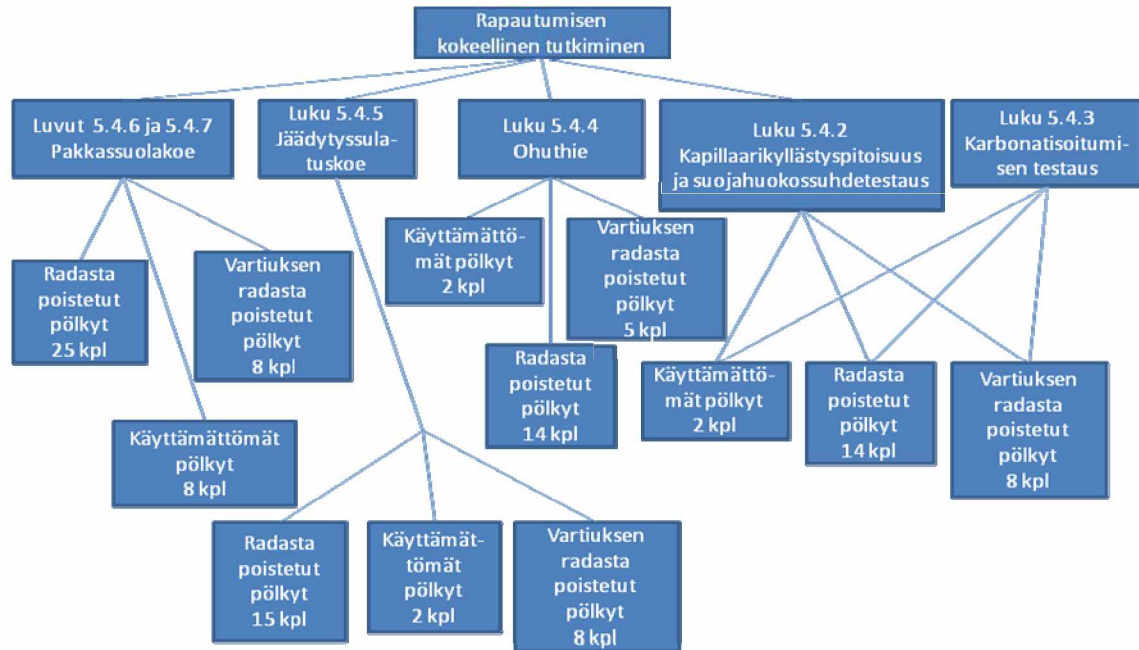
Tarkasteltava kohta	Uloke A	Kiskon vieri B	Seuraava C	Keskellä D
Pituus [mm]	500	200	150	900
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 7	100	500	800	100
Alustaluku [MN/m/m], jakauma 8	17	85	135	17

Laskentaesimerkit on esitetty liitteessä 1.

5 Betonin rapautumisen testaaminen

5.1 Yleiskuvaus

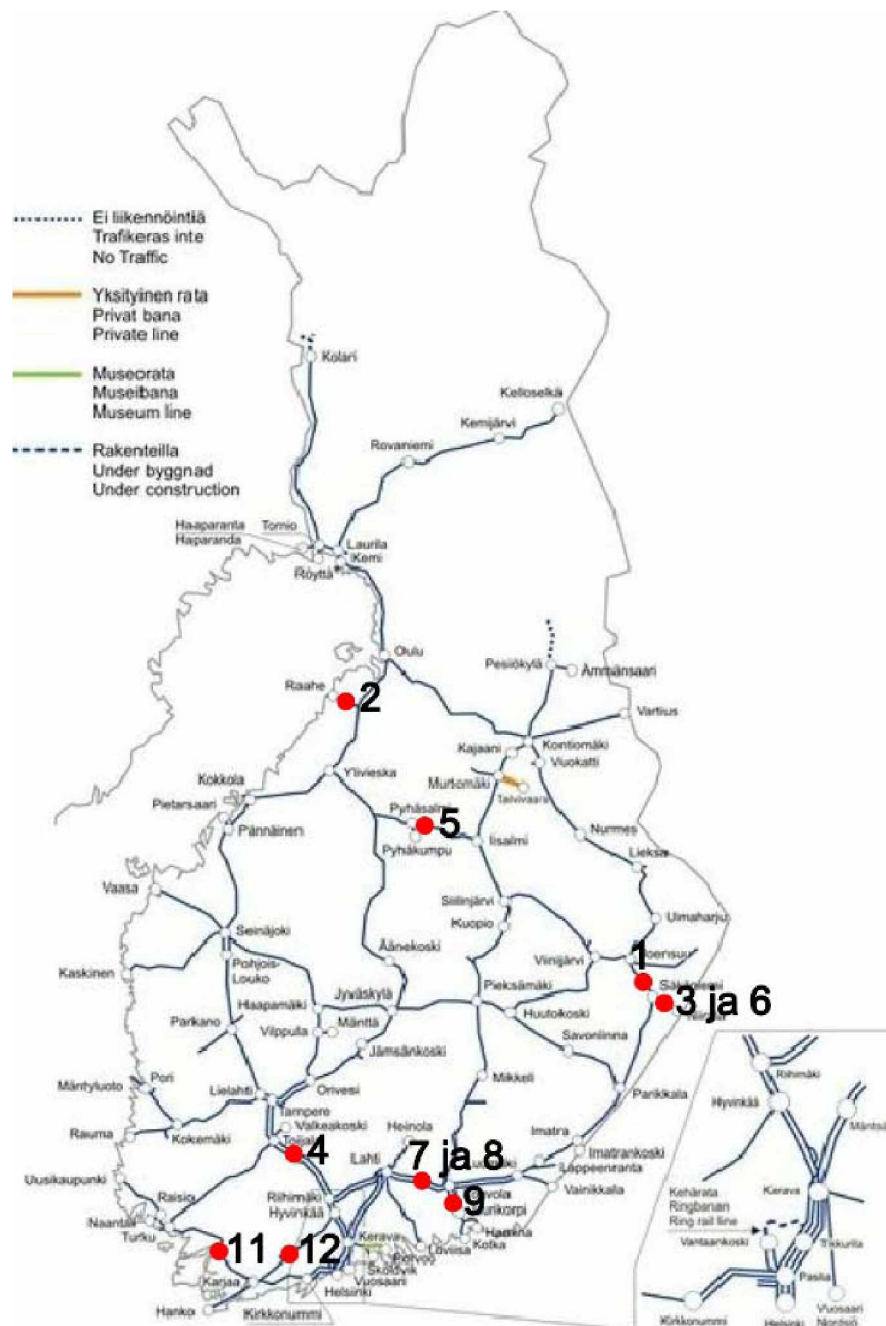
Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on tehty laaja-alaista tutkimustyötä koskien betoniratapölkkyjä. Tutkimustyön osana oli kattava betonin rapautumista käsittelevä kokeellinen osuusosuus. Kuva 5.1 esittää rapautumistutkimuksen kokeellisessa osuudessa tehdyt kokeet.



Kuva 5.1 Betoniratapölkkyjen rapautumisen kokeellinen osuus.

5.2 Tavoitteet ja tutkittavien ratapölkkyjen valintaperusteet

Betoniratapölkkyjen rapautumisen testaamisen tarkoituksena oli arvioida eri-ikäisten ratapölkkyjen betonin ominaisuuksia ja mahdollisia rapautumisen johdosta syntyneitä vaurioita. Ratapölkkyjä pyrittiin valitsemaan niiden iän, kunnon ja rasitusolosuhteiden perusteella. Tutkittavina oli käyttämättömiä ja käytöstä poistettuja pölkkyjä. Tutkittavina oli muun muassa Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyjä sekä Vartiuksen radasta poistettuja kunnoltaan eritasoisia pölkkyjä. Kuva 5.2 ja taulukko 5.1 esittää kohteet ja pölkkyjen valmistusvuodet, joista toimitettiin Lujan ja Parman valmistamia pölkkyjä rapautumistutkimuksiin. Taulukko 5.2 esittää Vartiuksen radasta rapautumistutkimuksiin toimitetut ratapölkkyt ja pölkkyjen silmämääräisesti arvioitu kunto.



Kuva 5.2 Kohteet joista toimitettiin Parman sekä Lujan valmistamia betonirata-pölkkyjä ja käytetyt koenumerot.

Taulukko 5.1 Kohteet joista toimitettiin Parman ja Lujan valmistamia betonirata-pölkkyjä sekä pölkkyjen valmistusvuodet.

Koe	Pölkky	Liikennepaikkaväli	Km	Valmistusvuosi
1	B97	Säkäniemi-Tikkala	591+500	1998
2	B97	Tuomioja-Raahe	701+629	1998
3	BP89	Tohmajärvi-Valkeasuo	574+100	7.1993
4	BP89	Riihimäki-Lielähti (Leteensuo)	122+300	1992
5	B97	Iisalmi-Ylivieska (Komu)	603+400	1998
6	BP89	Tohmajärvi-Valkeasuo	573+500	1993
7	BP89	Kausala-Koria	183	10.1994
8	BP89	Kausala-Koria	183	10.1994
9	B97	Inkeroinen-Juurikorpi		1997
10	BV75	Ei tiedossa		1977
11	BP89	Ervelä-Salo	126+742.9	9.1990
12	BP89	Nummela-Lohja		9.1991
13	BP99	Käyttämätön		30.11.2009
14	B97	Käyttämätön		13.3.2009

Taulukko 5.2 Vartiuksen radalta rapautumistutkimuksiin toimitetut pölkkyt ja niiden silmämääräisesti arvioitu kunto.

Koe	Pölkky	Valmistusvuosi	Kunto
V2	B75	1975	Huonokuntoinen
V3	B75	1975	Huonokuntoinen
V4	B75	1975	Huonokuntoinen
V5*	B75	1975	OK/lievästi vaurioitunut
V6*	BV63	1975	OK
V8*	B75	1975	OK
V9*	B75	1975	OK
V14*	B75	1975	Kohtalaisesti vaurioitunut

* Pölkkyille tehty kuormituskoe ennen näytteiden ottoa, ks. luku 2.5.4 ja 2.6.4 .

Edellä mainittujen kokeiden lisäksi vuonna 2010 tehtiin pelkästään pakkassuolakokeita yhteensä 19 näytesarjalle (luku 5.4.6). Näytesarjoista kuusi oli otettu käyttämättömistä ratapölkkyistä ja 13 käytöstä poistetuista ratapölkkyistä. Käytöstä poistetut pölkkyt oli toimitettu Kajaanissa sijainneelta käytöstä poistettujen ratapölkkyjen varastolta. Toimitetut pölkkyt oli 70-luvulla valmistettuja. Kajaanin varastoalueelta toimitetuille pölkkyille tehtiin laboratoriossa kuormituskokeita (luku 2.5.1) ennen näytteiden ottamista. Näytteiden otolla kuormitetuista pölkkyistä pyrittiin selvittämään rapautumisominaisuuksien ja kuormituskestävyyden yhteyttä.

5.3 Koeohjelma ja koejärjestelyt

5.3.1 Yleistä

TTY:lle toimitetuista ratapölkkyistä porattiin TTY:n laboratoriossa betonilieriöitä halkaisijaltaan 100 mm ja 50 mm, jotka ulottuivat pölkyn läpi pystysuunnassa. Ratapölkkyistä poratuille näytteille tehtiin seuraavat tarkastelut:

- silmämääräinen tarkastelu
- karbonatisoitumissyvyyden mittaus pH-indikaattoriliuoksella
- betonin suojahuokoisuuden mittaus
- betonin kapillaarikyllästyspitoisuuden mittaus
- pakkassuolakoe SFS 5449:1988 mukaisesti
- jäädytys-sulatuskoe SFS 5447:1988 mukaisesti
- rapautumisasteen arviointi ultraäänimittauksin jäädytys-sulatuskokeen edessä
- koekappaleiden halkaisuvetolujuuden testaus jäädytys-sulatuskokeen jälkeen ja vertaaminen vertailukoekappaleisiin
- ohuthietarkastelu

Koska näytteet otettiin olemassa olevista pölkkyistä, joiden käytössäoloaika ja rasitusolosuhteet käytön aikana vaihtelevat, myös niiden vaurioitumisen tila on eri kokeiden alussa. Tästä syystä otettiin jäädytys-sulatuskokeelle altistettavien näytteiden rinnalle myös vertailunäytteet, joihin saatuja tuloksia voidaan verrata pölkkykohtaisesti. Vertailunäytteitä ei rasitettu jäädytys-sulatuskokeissa. Joihinkin kokeisiin, kuten suojahuokossuhteen testaukseen pölkyn käyttöhistorialla ei oleteta olevan merkittävää vaikutusta.

5.3.2 Betoninäytteet ja niistä määritetyt mitat ja betonin tiheys

Ratapölkkyjä hankittiin laboratoriokokeita varten kolme erää. Erän 1 ratapölkkyt otettiin radasta. Kohteet hajautettiin maantieteellisesti, ja toimitettuihin pölkkyihin sisältyi eri aikoina valmistettuja ratapölkkyjä. Pohjoisimmat ratapölkkyt ovat liikennepaikkaväliltä Tuomioja-Raahe (nro 2) ja Komusta liikennepaikkaväliltä Iisalmi-Ylivieska (nro 5). Itäisimmät pölkkyt on hankittu Joensuun ja Niiralan väliseltä rataosuudelta (nro 1, 3, 6). Muut pölkkyt ovat olleet käytössä Etelä-Suomessa. Nro 4 Toijala-Riihimäki, 7 ja 8 Lahti-Kouvola, nro 9 Kouvola-Kotka. Eteläisimmät pölkkyt ovat nro 11 Karjaa-Salo rataosuudella ja nro 12 Lohjalla (kuva 5.2). Ratapölkkyt 13 ja 14 ovat käytämättömiä ja valmistettu 2009. Taulukko 5.3 esittää erän 1 ratapölkkyistä jäädytys-sulatuskoetta sekä pakkassuolakokeita lukuun ottamatta muita luvussa 5 käsiteltyjä kokeita varten valmistettujen koekappaleiden ominaisuudet.

*Taulukko 5.3 Koekappaleet erästä 1 (maantieteellinen hajautus) sarja A: pakkasrasitettavat näytteet, 100 sykliä sarja B: vertailunäytteet. *Näyte porattu eri terällä kuin muut*

Tunnus	Pölkkytyyppi	Valm. vuosi	Bet.tiheys (kuivapainosta) [kg/m ³]		kpl halkaisija [mm]	kpl pituus [mm]	
			A	B		A	B
1	B97	1998	2402,1	2389,6	51,5	100,5	99,5
2	B97	1998	2329,1	2342,2	51,5	101,0	98,0
3	BP89	1993	2432,5	2479,4	51,5	98,5	99,0
4	BP89	1992	2385,0	2397,0	51,5	100,5	100,0
5	B97	1998	2349,7	2338,8	51,5	100,0	100,0
6	BP89	1993	2410,2	2407,7	51,5	99,5	100,5
7	BP89	1994	2391,5	2395,1	51,5	98,0	100,0
8	BP89	1994	2390,9	2403,0	51,0*	101,5	101,5
9	B97	1997	2276,1	2280,5	51,5	99,0	102,0
10	BV75	1977	2506,0	2471,9	51,5	100,0	101,0
11	BP89	1990	2388,1	2407,9	51,5	100,5	101,0
12	BP89	1991	2408,2	2392,4	51,5	101,0	99,5
13	BP99	2009	2410,8	2434,7	51,5	99,0	99,0
14	B97	2009	2421,1	2428,6	51,5	98,5	99,0

Erän 2 ratapölkkyt ovat kaikki olleet käytössä samalla Vartiuksen rataosuudella. Pölkkyt on kaikki myös valmistettu samana vuonna 1975. Erään 2 pyrittiin saamaan sekä silmämääräisesti hyväkuntoisia että huonokuntoisia ratapölkkyjä. Taulukko 5.4 esittää koekappaleiden ominaisuudet erän 2 ratapölkkyistä.

Taulukko 5.4 Koekappaleet erästä 2 (hajautus vaurioitumisasteen mukaan) kaikki pölkkyt on valmistettu 1975 ja olleet käytössä samalla Vartiuksen rataosuudella. sarja A: pakkasrasitettavat näytteet, 50 sykliä, sarja B: vertailunäytteet, sarja C: pakkasrasitettavat näytteet, 100 sykliä.

Tunnus	Pölkkytyyppi	Silmäm. kunto	Bet.tiheys (kuivapainosta) [kg/m ³]			kpl halkaisija [mm]	kpl pituus [mm]		
			A	B	C		A	B	C
V2	B75	huonok.	2388,4	2379,3	2387,3	51,5	98,5	99,5	100,0
V3	B75	huonok.	2434,1	2416,1	2437,8	51,5	99,0	99,0	98,0
V4	B75	huonok.	2439,3	2403,2	2438,4	51,5	98,5	99,0	100,0
V5	B75	ok	2367,0	2407,8	2437,3	51,5	100,0	99,5	97,0
V6	BV69	ok	2383,0	2399,6	2361,4	51,5	98,0	97,0	100,5
V8	B75	ok	2437,1	2432,7	2404,9	51,5	99,5	99,0	99,0
V9	B75	ok	2471,5	2459,1	2464,7	51,5	99,0	99,5	99,5
V14	B75	kohtal.v.	2462,1	2432,8	2440,5	51,5	100,5	101,0	100,5

Erän 3 ratapölkkyt sisälsivät käytöstä poistettuja ja käyttämättömiä pölkkyjä. Käytöstä poistetut pölkkyt oli toimitettu Kajaanissa sijainneelta käytöstä poistettujen ratapölkkyjen varastolta. Käyttämättömiä pölkkyjä edustivat Parman BP99 ja Lujan B97. Toimitetut pölkkyt on esitetty taulukossa 5.5.

Taulukko 5.5 Koesarjat erästä 3.

Tunnus	Pölkkytyyppi	Valm. vuosi
1, L1	B63	1974
5, 14, L2	B75	1976
3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, L3	BV75	1977
2, 12, L4	B97	2009
4, 13, L5	BP99	2009

5.3.3 Silmämääräinen tarkastelu

Betonin ominaisuudet määritettiin poratuista näytteistä silmämääräisesti. Maksimi raekoko mitattiin näytteiden pinnassa olevista kiviainesrakeista. Laatu määritettiin silmämääräisesti asteikolla 1...5 (huono – heikko – keskinkertainen – hyvä – erittäin hyvä). Tässä tarkastelussa kiinnitettiin huomiota lähinnä betonin tiivistymiseen ja halkeiluun.

Silmämääräinen tarkastelu tehtiin koko pölkyn läpi ulottuvista näytteistä. Tämän jälkeen koekappaleet leikattiin timanttisahaamalla sopivan kokoisiksi koekappaleiksi. Näistä koekappaleista mitattiin koekappaleiden halkaisija ja pituus sekä massa ja tiheys muita kokeita varten.

5.3.4 Suojahuokossuhteen ja kapillaarikyllästyspitoisuuden määrittäminen

Suojahuokossuhteen määrittäminen tehtiin soveltamalla standardia SFS 4475. Suojahuokokset ovat kokonsa vuoksi kapillaarisesti täyttymättömiä huokosia betonissa, jotka edesauttavat betonin pakkasenkestävyyttä. Pakkaskestävyyden varmistamiseksi suojahuokossuhteen tulee olla vähintään 0,20, eli suojahuokosten osuuden koko huokostilavuudesta on oltava vähintään viidennes (Suomen Betoniyhdistys 1980). Punnitsemalla koekappaleiden kuivapaino sekä massa vedellä kapillaarisesti kyllästettynä ja paineisesti kyllästettynä (jolloin koko huokostilavuus täyttyy) voidaan betonille määrittää punnitustuloksista laskemalla betonin pakkasenkestävyyttä kuvaava suojahuokossuhde sekä kapillaarikyllästyspitoisuus, joka kertoo kapillaarisesti täyttyvien huokosten määrän betonissa. Koemenetelmästä johtuen kapillaarikyllästyspitoisuus saadaan osuutena kappaleen painosta. Arvo voidaan muuttaa betonin tiheyden avulla tilavuusosuudeksi.

Kuivapaino määritettiin koekappaleista punnitsemalla ne noin 3 vrk kestäneen 105 °C uunikuivatuksen jälkeen. Koekappaleiden kapillaarikyllästys tehtiin täyttämällä koekappaleet sisältävä astia vedellä ensin koekappaleiden puoliväliin asti ja noin vuorokauden jälkeen täyttämällä loppuun asti niin, että koekappaleet peittyivät kokonaan. Kappaleet punnittiin noin 3 vrk imeytysajan jälkeen. Vakuumi-imeytys tehtiin asettamalla uunikuivatut koekappaleet vakuumiastiaan kahdeksan tunnin ajaksi, jonka jälkeen vakuumiastia täytettiin vedellä. Koekappaleiden annettiin olla vesiupotuksessa noin 3 vrk, jonka jälkeen ne punnittiin. Tässä kokeessa ylipaineen sijaan käytettiin alipainetta. Punnitusten suoritusjärjestys oli kapillaarikyllästys, uunikuivaus ja vakuumi-imeytys.

5.3.5 Karbonatisoitumissyvyyden mitta

Karbonatisoitumissyvyys määritettiin betonilieriöiden tuoreelta leikkauspinnalta fenoliftaleiiniuoksen avulla. Fenoliftaleiini on pH-indikaattori, joka reagoi karbonatisoitumattoman betonin korkeaan pH-arvoon (pH n. 13–14) värjäten betonin punaiseksi. Karbonatisoitunut, alhaisemman pH:n (pH n. 8) betoni säilyy kokeessa värjäytymättömänä. Näytteen pinnasta betonin sisään edenneen karbonatisoituneen betonin syvyys mitattiin värjäytymättömän kerroksen paksuutena työntömitalla.

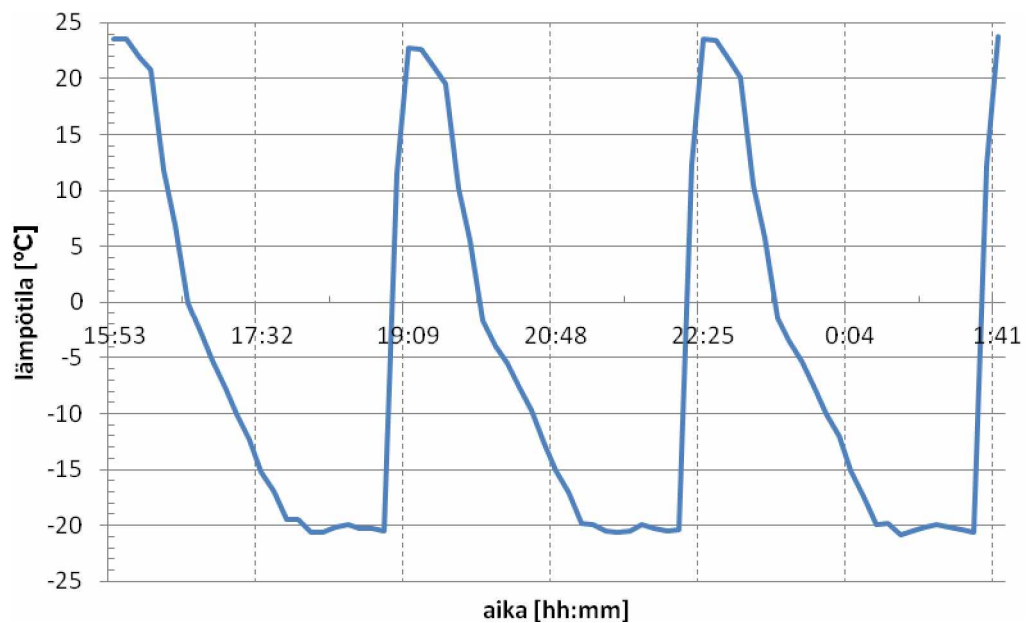


Kuva 5.3 Karbonatisoitumissyvyyden mitta betonilieriöistä. Kokeessa korkean pH:n betoni värjäytyy punaiseksi. Karbonatisoitumissyvyys mitattiin värjäytymättömän kerroksen paksuutena.

5.3.6 Jäädytys-sulatuskoe (SFS-5447)

Betonikoekappaleiden pakkaskoe ilman suolarasitusta tehtiin standardin SFS-5447 mukaisesti erillisellä jäädytys-sulatuslaitteistolla. Kuvan 5.4 mukaisia jäädytys-sulatussyklejä ajettiin 50–100 kpl, joiden aikana tehtiin betonin rapautumista mittaavia rinnakkaiskokeita. Rinnakkaiskokeeksi valittiin lieriökoekappaleille soveltuvana testimenetelmänä halkaisuvetolujuuden testaus sekä rasitetuista että vertailukoekappaleista.

Betonikoekappaleet asetettiin jäädytys-sulatuslaitteistoon ja pakkasrasitusta ohjattiin lämpötila-anturilla varustetulla ohjausprismalla. Rasituslaitteiston ilman lämpötila mitattiin n. 20 cm koekappaleiden yläpuolelta. Pakkasrasitusyksi koostui jäädytysvaiheesta, jonka aikana näytteet tavoittivat -20 °C lämpötilan, tunnin pitojaksosta -20 °C lämpötilassa ja tämän jälkeen sulatuksesta lämpimällä vedellä. Noin kolmen tunnin pituisen syklin ajasta koekappaleet olivat pakkasen puolella noin 2 h 10 min, 0-astetta lämpimämpiä 50 min ja yli 20 °C lämpötilassa noin 20 min. Jäätymisnopeus on kokeessa keskimäärin 0,36 °C/min yhtäjaksoisesti n. kahden tunnin ajan ja sulamisnopeus 2,5 °C/min. Koekappaleen lämpötila kolmen jäädytys-sulatussyklin aikana on esitetty kuvassa 5.4.



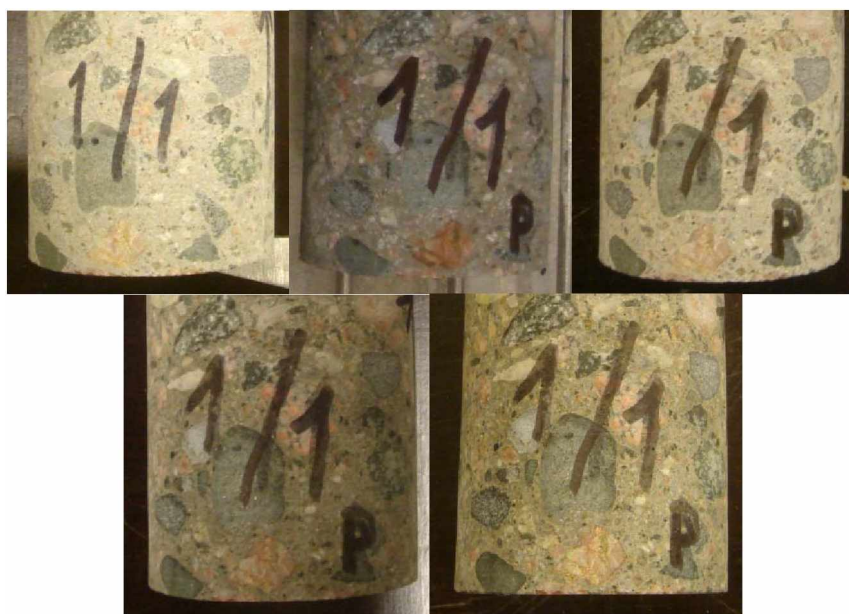
Kuva 5.4. Jäädytys-sulatuskokeen lämpötilat kolmen syklin ajalta. Koekappaleet jäädytettiin ilmassa ja sulatettiin vesiupotuksessa, jonka jälkeen vesi pumpattiin pois.

Edellä kuvattuja syklejä ajettiin kokeessa 50 ja 100 kpl eri koekappalesarjoille ja määritettiin ultraäänen etenemisnopeus betonissa 25 syklin välein sekä koejakson päätteeksi jäljellä oleva betonin halkaisuvetolujuus. Pakkasrasitettavien koekappaleiden lisäksi valmisteltiin vertailuerä, joka säilytettiin vesiupotuksessa kokeiden ajan ja kuormitettiin samaan aikaan pakkasrasitetun erän kanssa. Seuraavassa taulukossa 5.6 on esitetty koekappalesarjojen testiohjelma.

Taulukko 5.6. Jäädytys-sulatuskokeiden testiohjelma eri koekappale-erille.

Sarja (ks. luku 5.3.2)	Pakkasrasitus (SFS-5447)	Tehdyt kokeet
ERÄ 1, sarja A	100 sykliä	ultraäänen etenemisnopeus ja punnitseminen 25 syklin välein, halkaisuvetolujuus 100 sykliä
ERÄ 1, sarja B	vertailu (vesiupotus, ei pakkasrasitusta)	ultraäänen etenemisnopeus alussa ja lopussa, halkaisuvetolujuus
ERÄ2 (V), sarja A	50 sykliä	ultraäänen etenemisnopeus 25 syklin välein, halkaisuvetolujuus 50 sykliä
ERÄ2 (V), sarja B	vertailu (vesiupotus, ei pakkasrasitusta)	ultraäänen etenemisnopeus alussa ja lopussa, halkaisuvetolujuus
ERÄ2 (V), sarja C	100 sykliä	ultraäänen etenemisnopeus 25 syklin välein, halkaisuvetolujuus 100 sykliä

Erän 1 kokeet tehtiin aikajärjestyksessä ensin ja niiden yhteydessä havaittiin osassa näytteistä selvä muutos ultraäänen nopeudessa 50 syklin jälkeen. Tästä syystä seuraavaan erään otettiin mukaan uusi koekappalesarja, joka kuormitettiin jo 50 syklin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.



Kuva 5.5. Erän 1 koekappale 1A kokeen alussa (ylhäällä vasemmalla) sekä 25, 50, 75 ja 100 syklin jälkeen.

5.3.7 Betonin rapautumisen tutkiminen ultraäänimittauksilla

Betonin rapautumisen tutkiminen ultraäänimittauksilla perustuu äänen etenemisnopeuden muutokseen betoniväliaineessa. Ääni kulkee väliaineen läpi lyhintä reittiä pitkin. Tämän matkan kulkemiseen kulunut aika, ts. *läpäisy aika* voidaan mitata erillisen mittalaitteiston avulla. Ultraäänen etenemisnopeus väliaineessa muuttuu materiaalin

tiheyden ja jäykkyyssominaisuuksien mukaan. Rapautumisen seurauksena betonin elastisuus muuttuu, joka voidaan havainnoida ultraäänen etenemisnopeuden muutoksena. Ultraäänen etenemisnopeuden V , materiaalin dynaamisen kimmomoduulin E ja materiaalin tiheyden ρ välillä on yhteys (jossa ν on Poisson suhde) (Grantham, 2003):

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5-1)$$

Ultraäänimittauksia voidaan käyttää betonin sisäisen rapautumisen tutkimiseen mitaamalla ultraäänen läpäisy aika säännöllisin väliajoin betonin rapautumisen edetessä. Läpäisyajasta laskettua äänen nopeutta vertaamalla alkutilanteessa määritettyyn äänen nopeuteen voidaan arvioida betonin rapautumisen *vaurioastetta*.

Johtamalla edellisestä kaavasta (5-1) nähdään, että dynaamisen kimmomoduulin E suhteellinen pieneneminen on verrannollinen ultraäänen etenemisnopeuden V suhteellisen pienenemisen neliöön:

$$\frac{E_N}{E_0} = \left(\frac{V_N}{V_0} \right)^2 \quad (5-2)$$

kaavassa:

E_N = dynaaminen kimmomoduuli N jäädytys-sulatussyklin jälkeen

E_0 = dynaaminen kimmomoduuli kokeen alussa

V_N = ultraäänen nopeus betonissa N jäädytys-sulatussyklin jälkeen

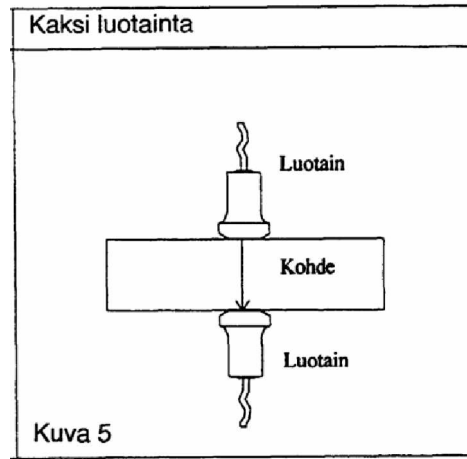
V_0 = ultraäänen nopeus betonissa kokeen alussa

Betonin pakkasrapautumisesta aiheutuva vaurioaste D kuvaa dynaamisen kimmomoduulin suhteellista pienentymistä ja on mittayksikötön luku väliltä $[0...1]$. (Fagerlund 1994):

$$D = 1 - \frac{E_N}{E_0} = 1 - \left(\frac{V_N}{V_0} \right)^2 \quad (5-3)$$

Betonin tutkimiseen ultraäänimittauksin sisältyy epävarmuustekijöitä, koska betoni on hyvin epähomogeenistä ja huokoista materiaalia. Tästä syystä betonin koostumus kuten sideaineen määrä ja tyyppi, vesi-sideainesuhde, huokosten määrä sekä betonin kosteuspitoisuus testattaessa vaikuttavat mitattuun etenemisnopeuteen. Lisäksi testilaitteen lähettimen ja vastaanottimen kontakti ja paine betonin pintaan osaltaan vaikuttavat mittaustuloksiin. Epävarmuustekijöitä pyrittiin kokeissa pienentämään vakioimalla koekappaleiden kosteusolosuhteita mittaushetkellä sekä tekemään mitaukset aina saman henkilön toimesta samasta kohtaa koekappaleista.

Tässä tutkimuksessa ultraäänimittaukset tehtiin läpäisymenetelmällä, jossa mittalaitteeseen on kytketty erillinen lähetin ja vastaanotin, ja signaali kulkee lähettimeltä betonikoekappaleen läpi vastaanottimeen. [SFS-EN 583-3]. Periaate on esitetty kuvassa 5.6. Mittalaite ilmoittaa läpäisyajan, josta voidaan laskea äänen nopeus, kun tiedetään koekappaleen mitat. Äänen nopeudelle rapautumattomassa betonissa on kirjallisuudessa annettu arvoja 3500–4500 m/s (Qasrawi, 2000; Popovics & Popovics, 1991) tai 3200 – 5500 m/s (Kewalramani & Gupta, 2006). Parhaiten rapautumisen etenemistä kuvaa kuitenkin äänen nopeuden heikentyminen verrattuna alkutilanteeseen.



Kuva 5.6. Ultraäänen läpäisyajan mittaaminen koekappaleesta käyttäen erillistä lähetintä ja vastaanotinta. [SFS-EN 583-3].

Ultraäänimittaukset tehtiin 25 jäädytys-sulatussyklin välein. Ultraäänen läpäisy aika mitattiin kolmessa betoninäytteen kosteustilassa: heti syklin jälkeen, kuivana ja kapillaarisesti vedellä kyllästettynä. Koekappaleet kuivattiin 105 °C uunissa kolme vrk., jonka jälkeen mitattiin ultraäänen läpäisy aika. Koekappaleita imeytettiin sen jälkeen kolme vrk. kapillaarisesti ja mitattiin ultraäänen läpäisy aika.



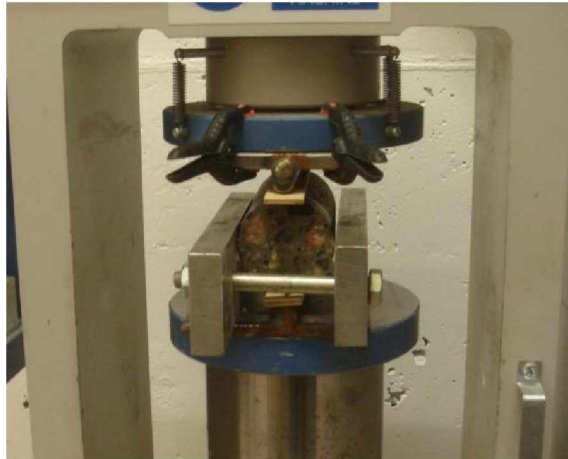
Kuva 5.7. Ultraäänimittauksen koejärjestely ja käytetty mittalaite.

5.3.8 Halkaisuvetolujuuden testaus

Ultraäänen etenemisnopeuteen perustuvan rapautumisasteen arvioinnin lisäksi koekappaleista mitattiin jäljellä oleva halkaisuvetolujuus 100 jäädytys-sulatussyklin jälkeen. Erästä 2 valmistettiin ylimääräinen sarja, jonka halkaisuvetolujuus testattiin jo 50 syklin jälkeen. Lisäksi molemmissa eristä testattiin vertailukoekappaleiden halkaisuvetolujuus pakkasrasittamattomista koekappaleista.

Halkaisuvetolujuuden testaus tehtiin soveltaen standardia SFS-EN 12390-6. Testaus tehtiin halkaisijaltaan 50 mm ja pituudeltaan 100 mm lieriökoekappaleille purista-

mallalla kappale halki pituussuunnassa. Kuormitus tehtiin kuvassa 5.8 esitettävällä ELE AUTOTEST 25/250 -kuormituslaitteistolla. Puristuksen kohdistamiseen käytettiin teräslevystä ja -tangosta valmistettuja kuormituksen kohdistimia ja koekappaleen ja kohdistimen välissä käytettiin vanerista tasauslistaa. Kuormitusnopeus kokeessa oli 0,50 kN/s.

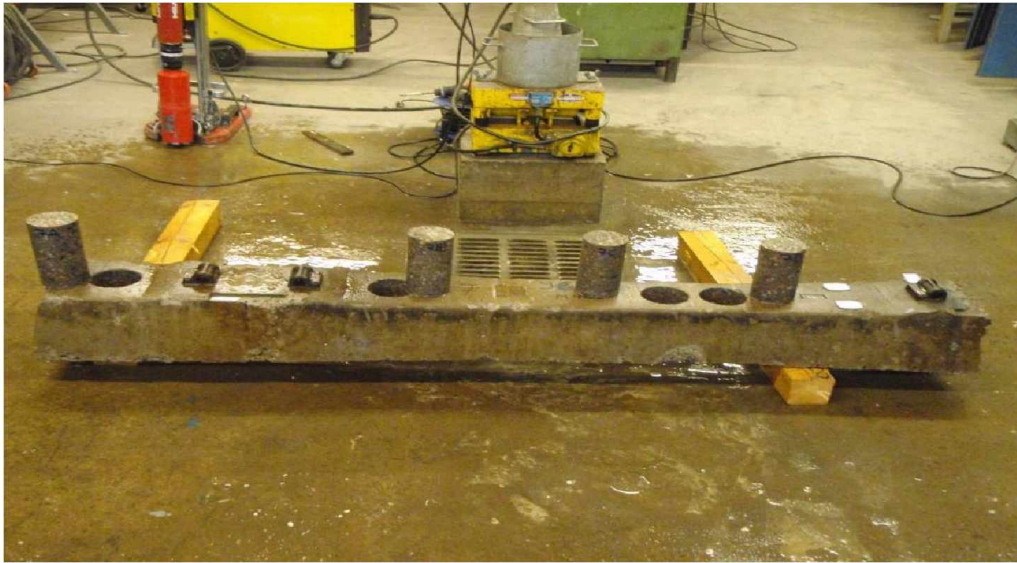


Kuva 5.8. Halkaisuvetolujuuden testauksen koejärjestely. Teräslevyistä kootun kehon tarkoitus oli estää betonikappaleiden leviäminen ympäristöön. Kehikko asetettiin niin että se ei tukenut koekappaletta kuormituksen aikana.

5.3.9 Pakkassuolakoe

Sekä käyttämättömille että käytöstä poistetuille betoniratapölkyille tehtiin pakkassuolakestävyyskokeita standardin SFS 5449 (1988) mukaisesti. Kokeella pyrittiin selvittämään betonin alttiutta pakkasrapautumiselle.

Yhtä pakkassuolakoetta varten tarvittiin kolme samasta ratapölkystä porattua koekappaletta. Koekappaleet olivat korkeudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm lieriöitä. Näytteet valmistettiin poraamalla halkaisijaltaan 100 mm lieriöitä (kuva 5.9), jotka katkaistiin 100 mm määrämittäisiksi. Koekappaleet pyrittiin ottamaan ratapölkyn eri kohdista siten, että jokainen näytesarja sisältäisi betonia sekä ratapölkyn keskeltä että pinnasta. Ratapölkkyjen rauditus ja varsinkin käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä olevat halkeamat rajoittivat näytteiden ottamista. Ennen jäädytys-sulatus-syklien aloittamista näytteet kyllästettiin vedellä kuvan 5.10 mukaisesti.



Kuva 5.9 Ratapölkystä poratut näytteet odottamassa 100 mm korkuisiksi sahaimista.



Kuva 5.10 Näytteet veteen upotettuina kyllästämisen aikana.

Pakkassuolakokeessa koekappaleet altistetaan jäädytys-sulatus-sykleille, joita vaaditaan Liikenneviraston esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa (RHK 2008) yhteensä 50 kappaletta. Sulatushaude oli vesijohtovettä, jonka lämpötilan tuli olla 20 ± 2 °C. Kylmähauteena tuli standardin mukaan olla kylläinen NaCl-vesiliuos, jonka lämpötila on -15 ± 1 °C. Sulatus- ja kylmähauteiden liuosten tilavuuden oli oltava vähintään 8-kertainen koekappaleiden yhteistilavuuteen verrattuna.

Ensimmäisessä koe-erässä vuonna 2010 kokeet tehtiin muuten standardin SFS 5449 mukaisesti, mutta kylläisen NaCl-vesiliuoksen valmistamiseen käytettiin merisuolaa. Merisuola koostuu pääasiassa natriumkloridista, jota siinä on noin 94 %. Merisuolan pääasiallisina epäpuhtauksina ovat magnesiumsulfaatti ja kaliumsuolat. Epäpuhtauksilla todettiin dramaattinen merkitys koekappaleiden jäädytys-sulatuskestävyyteen (ks. kohta 5.4.6). Virheellisestä suolan käytöstä johtuen pakkassuolakokeet uusittiin viidelle näytesarjalle. Uusituissa kokeissa suolana käytettiin J.T.Bakerin valmistamaa natriumkloridia, jonka natriumkloridi pitoisuus oli minimissään 99,5 %.

Vuonna 2010 tehdyissä kokeissa kylmähaude ja sulatushaude olivat edellisen kuvan 5.10 mukaisissa astioissa, mitkä olivat riittävän suuria koko koekappalemäärälle. Tällä pystyttiin varmistamaan kokeen aikana lähes identtiset olosuhteet kaikille näytekappaleille. Koekappaleet sijoitettiin kylmä- ja sulatushauteeseen siten, että kappaleiden keskinäiset etäisyydet kuten myös etäisyydet altaan seiniin olivat vähintään 20 mm. Jäädytys-sulatuskierros sisälsi 8 tunnin jäädytysvaiheen ja 16 tunnin sulatusvaiheen. Tilapäisten kierrosrytmihäiriöiden aikana koekappaleet pidettiin vesihautteessa.

Vartiuksen radasta poistettujen pölkkyjen sekä Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyjen pakkassuolakokeissa käytettiin Prolabon valmistamaa Natriumkloridia, jonka natriumkloridipitoisuus oli 99,7 %.

Vuoden 2010 kokeista poiketen kylmähaudetta ei säilytetty pakkashuoneessa vaan arkkupakastimissa olevissa astioissa. Pakastimien toimintaa säädeltiin ulkoisen termostaatin avulla, jolloin kylmähauteen lämpötila saatiin pysymään vaadituissa rajoissa.

Pakkassuolakokeella selvitettävää betonin rapautumisalttiutta seurattiin koekappaleiden tilavuuden muutoksen avulla. Kokeesta saatava tilavuudenmuutos oli yksittäisten koekappaleiden tilavuudenmuutoksen keskiarvo. Koekappaleiden prosentuaalinen tilavuuden muutos ΔV lasketaan kaavalla 7.

$$\Delta V = 100 \frac{(m_2 - m_3) - (m_5 - m_4)}{(m_2 - m_3)} \% \quad (5-4)$$

Yhtälössä :

m_2	Koekappaleen ilmassa punnittu massa imeytyksen jälkeen, [g]
m_3	Koekappaleen vedessä punnittu massa imeytyksen jälkeen, [g]
m_4	Koekappaleen vedessä punnittu massa jäädytys-sulatuskierrosten jälkeen, [g]
m_5	Koekappaleen ilmassa punnittu massa jäädytys-sulatuskierrosten jälkeen, [g]

Pakkassuolakokeen aikaansaaman prosentuaalisen tilavuudenmuutoksen ΔV avulla voidaan määrittää Esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (Ratahallintokeskus 2008) vaatima pakkasenkestävyysluku P. Pakkasenkestävyysluvun määrittämiseksi kaavaan 8 sijoitetaan prosentuaalinen tilavuuden muutos 50 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen.

$$P = \frac{100}{\Delta V(50)} \quad (5-5)$$

Pakkasenkestävyysluku tulee olla 50 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen vähintään 25, mikä vastaa enintään 4 % tilavuuden muutosta näytteissä. (RHK 2008)

5.3.10 Muut tarkastelut

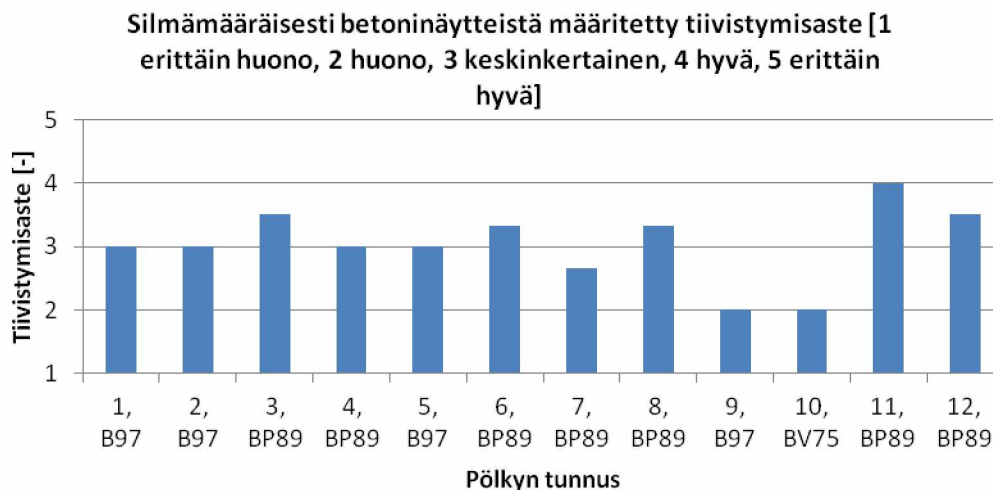
Jäädytys-sulatuskokeen aikana seurattiin myös erän 1 koekappaleiden massan muutosta kokeen edetessä. Koekappaleet punnittiin 25 jäädytys-sulatussyklin välein muiden kokeiden ohessa sekä kuivana että vedellä kapillaarisesti kyllästettynä. Erän 2 näytteille ei tehty punnituksia jäädytys-sulatussykliden välissä.

Lujan ja Parman alkupääntuotannon pölkyistä porattiin yhteensä 15 näytettä ja Vartiuksen ratapölkyistä viisi näytettä ohuthietarkasteluja varten. Ohuthietarkastelujen avulla pyrittiin selvittämään betonin ominaisuuksia ja mahdollisesti radassa syntyneitä pakkasrasituksen aikaansaamia vaurioita.

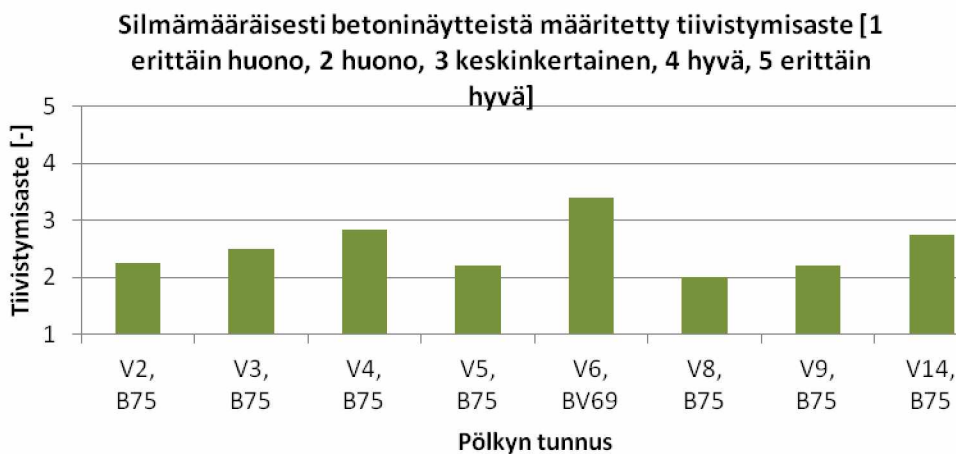
5.4 Tulokset

5.4.1 Silmämääräinen tarkastelu

Kuvassa 5.11 on esitetty silmämääräisesti määritetty tiivistymisaste erälle 1 ja kuvassa 5.12 erälle 2. Tiivistymisasteen määrittäminen on osa silmämääräistä tarkastelua ja se pohjautuu ilmahuokosten määrään betoninäytteen porauspinnalta tarkasteltuna. Tiivistymisasteen kautta saadaan tietoa betonin laadusta ja valmistuksen onnistumisesta sekä viitteitä betonin huokoisuudesta.



Kuva 5.11 Erän 1 ratapölkkyjen betonin silmämääräisesti määritetty tiivistymisaste.



Kuva 5.12 Erän 2 ratapölkkyjen tiivistymisaste.

5.4.2 Suojahuokossuhde ja kapillaarikyllästyspitoisuus

Koekappaleista mitatut kapillaarikyllästyspitoisuus ja suojahuokossuhde sekä kapillaarikyllästyspitoisuudesta betonin kuivatiheyden avulla laskettu kapillaarihuokoisuus on esitetty taulukoissa 5.7 ja 5.8. Vaatimus pakkasenkestävän betonin suojahuokossuhteelle on yleisesti 0,20 (Suomen Betoniyhdistys 1980). Huokostuksella ei ole enää pakkasenkestävyyttä parantavaa vaikutusta, jos suojahuokossuhde on alle 0,10 (Lahdensivu 2012). Suoraa vertailukohtaa ratapölkkyjen betonin kapillaarihuokoisuudelle ei ole. SIHA-tarkkailusiltojen (Tulonen et al. 2013), joiden betoninäytteistä määritetty puristuslujuus vaihteli välillä 25 – 90 MPa, betonin kapillaarihuokoisuudet ovat välillä 3,8 – 14,1 %.

Taulukko 5.7. Erän 1 näytteiden kapillaarikyllästyspitoisuudet ja suojahuokossuhteet.

tunnus	pölkkytyyppi	valm. vuosi	kapillaarikyllästyspitoisuus [p-%]	kapillaarihuokoisuus [%]	suoja-huokossuhde
1	B97	1998	4,1	9,9	0,11
2	B97	1998	4,6	10,8	0,20
3	BP89	1993	3,9	9,7	0,06
4	BP89	1992	4,1	9,7	0,14
5	B97	1998	5,0	11,7	0,16
6	BP89	1993	4,2	10,0	0,05
7	BP89	1994	4,4	10,5	0,02
8	BP89	1994	4,1	9,8	0,14
9	B97	1997	4,1	11,2	0,24
10	BV75	1977	4,9	8,1	0,14
11	BP89	1990	3,2	10,0	0,06
12	BP89	1991	4,2	9,9	0,07
13	BP99	2009	4,1	10,7	0,07
14	B97	2009	4,4	7,8	0,22

Erän 1 kapillaarihuokoisuus on keskimäärin 10,0 %, (vaihteluväli 7,8 – 11,7 %) ja suojahuokossuhde on keskimäärin 0,12 (vaihteluväli 0,02 – 0,24). Erästä 1 pölkkyt 2 ja 10 täyttävät suojahuokossuhteen vaatimuksen. Pölkkytyypeittäin tarkasteltuna BP89 tyyppin pölkyissä suojahuokossuhteet ovat keskimäärin alhaisempia kuin B97 tyyppin pölkyissä.

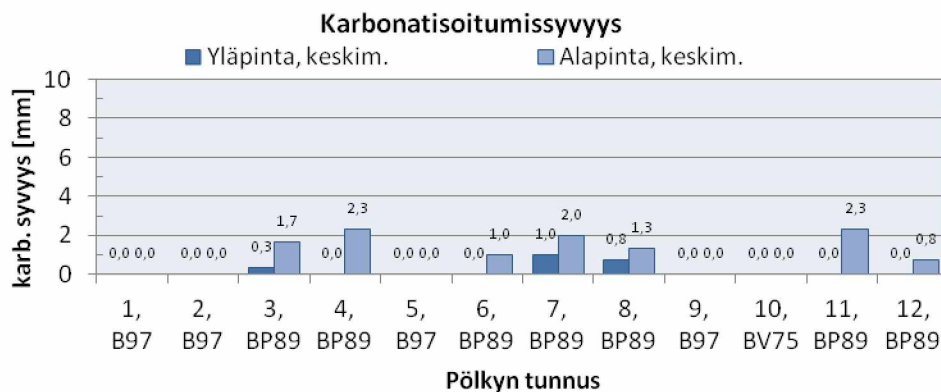
Taulukko 5.8 Erän 2 näytteiden kapillaarikyllästyspitoisuudet ja suojahuokossuhteet.

tunnus	pölkky- tyyppi	kapillaarikyllästys- pitoisuus [p-%]	kapillaari- huokoisuus [%]	suoja- huokos- suhde
V2	B75	3,6	8,6	0,21
V3	B75	3,7	9,0	0,10
V4	B75	3,5	8,4	0,11
V5	B75	3,2	7,7	0,23
V6	BV69	4,7	11,2	0,02
V8	B75	2,9	7,0	0,23
V9	B75	2,9	7,1	0,16
V14	B75	3,7	9,1	0,05

Erän 2 kapillaarihuokoisuuden keskiarvo on 8,5 % (vaihteluväli 7,0 – 11,2 %). Erän 2 suojahuokossuhteen keskiarvo on 0,14 (vaihteluväli 0,02 – 0,23). Erästä 2 pölkkyt V2, V5 ja V8 täyttävät suojahuokossuhteen vaatimuksen.

5.4.3 Karbonatisoitumissyvyys

Näytteistä fenoliftaleiinin menetelmällä mitatut karbonatisoitumissyvyys on esitetty kuvassa 5.13. Yleisesti, mitatut karbonatisoitumissyvyys olivat hyvin pieniä ja suurimmassa osassa näytteitä ei havaittu lainkaan karbonatisoitumista.



Kuva 5.13. Erän 1 näytteistä mitatut karbonatisoitumissyvyys. Arvot koostuvat kolmen näytteen keskiarvosta.

Erän 2 näytteissä ei pH-indikaattorilla havaittu lainkaan karbonatisoitumista.

Erän 1 pölkkyissä 3, 4, 6, 7, 8, 11 ja 12 havaittiin pölkyn alapinnan betonin karbonatisoituneen keskimäärin 0,8–2,3 mm. Pölkkyissä 3, 7 ja 8 mitattiin myös pölkyn yläpinnasta keskimäärin 0,3–1,0 mm karbonatisoitumissyvyys. Muissa näytteissä ei havaittu karbonatisoitumista. Mitatun keskimääräisen karbonatisoitumissyvyys ja rakenteen iän mukaan voidaan määrittää karbonatisoitumiskerroin, joka kuvaa karbonatisoitumisen nopeutta. Tyypillisesti normaalilaatuisen betonin karbonatisoitumiskerroin on luokkaa 1 (Grantham 2012), eli laskennallisesti arvioituna karbonatisoituminen olisi tämän ikäisessä betonissa edennyt 4 – 5 mm. Betonin säilyminen jatkuvasti kosteana hidastaa merkittävästi karbonatisoitumista estäen reaktion tarvitseman hiidioksidin pääsyn betonin huokosrakenteeseen. Yleisesti tiivis betoni karbonatisoituu hitaammin. Käytetty sementtimäärä ja hydrataatioaste vaikuttavat myös kar-

bonatisoitumisen etenemiseen siten, että karbonatisoituvan aineksen määrän ollessa suuri (suuri sementtimäärä, alhainen hydrataatioaste), betoni karbonatisoituu hitaammin. Pölkkybetoneissa hydrataatioaste on yleensä korkea, eli lähes kaikki vapaa sementti sitoutuu hydrataatioreaktiossa.

5.4.4 Ohuthietarkastelut

Osalle ratapölkkyjen näytteistä teetettiin ohuthietarkasteluja Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:llä. Tarkastelussa keskityttiin betoninäytteissä esiintyvän halkeilun tutkimiseen. Lisäksi saatiin tietoa kovettuneen betonin ominaisuuksista. Seuraavissa taulukoissa 5.9 ja 5.10 on kerätty keskeisimpiä ohuthietarkastelussa tehtyjä havaintoja. Tarkemmat ohuthieraportit on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 5.9. Erä 1 ohuthieet. Lyhenteet halkeilulle ovat: mek.=mekaaninen, valm.aik.=valmistuksen aikainen, yl.pakk.r.=yleistä pakkasrapautumaa, alk.pakk.r.=alkavaa pakkasrapautumaa, AKR=alkalikiviainesreaktioon liittyvää halkeilua.

Tunnus	Karbonatisoituminen	Lisähuokostus	Täyteisyys	Sideainekiviainekontakti	Halkeilu
1 yläpinta (B97)	0 – 1 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 20 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
2 yläpinta (B97)	0 – 3 mm	osittain epäonnistuneelta vai-kuttava	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 16 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
2 alapinta (B97)	0 – 1 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 20 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
3 yläpinta (BP89)	0,5 – 2 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 18 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
4 yläpinta (BP89)	0,5 – 3,5 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ei	pääosin ehjiä	n. 11 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
5 yläpinta (B97)	0,1 – 1 mm	osittain epäonnistuneelta vai-kuttava	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 5 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)
6 yläpinta (BP89)	1,5 – 3 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki-teymiä	pääosin ehjiä	n. 10 kpl mikrohalkeamaa (mek./valm.aik.)

6 alapinta (BP89)	2 – 4 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	pääosin ehjiä	n. 17 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
8 yläpinta (BP89)	1,5 – 13 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ei	pääosin ehjiä	n. 11 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
9 yläpin- ta (B97)	0 – 4 mm	osittain epäon- nistuneelta vai- kuttava	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	ehjät	n. 3 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
10 yläpin- ta (BV75)	0 – 0,4 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	pääosin ehjiä	runsaasti (yli 80 kpl) mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
11 yläpin- ta (BP89)	1 – 4 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	pääosin ehjiä	n. 23 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
11 alapin- ta (BP89)	2 – 5 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	pääosin ehjiä	n. 20 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
12 yläpin- ta (BP89)	0 – 1,5 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täyteki- teymiä	pääosin ehjiä	n. 14 kpl mikro- halkeamaa (mek./valm.aik.)
13 yläpin- ta (BP99)	0,1 – 6 mm	epäonnistuneelta vaikuttava	ei	pääosin ehjiä	1 kpl mikro- halkeamaa (mek.)
14 yläpin- ta (B97)	2 – 5 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ei	ehjät	ei halkeilua

Taulukko 5.10. Erä 2 ohuthieet. Lyhenteet halkeilulle ovat: mek.=mekaaninen, valm.aik.=valmistuksen aikainen, yl.pakk.r.=yleistä pakkasrapautumaa, alk.pakk.r.=alkavaa pakkasrapautumaa, AKR=alkalikiviainesreaktioon liittyvää halkeilua.

Tunnus	Karbonati-soituminen	Lisähuokostus	Täytteisyys	Sideaine-kiviainekontakti	Halkeilu
V3 (B75)	0,2 – 1 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täy- tekiteymiä	pääosin ehjiä	säröilyä (valm.aik.), 2 kpl halkeamaa (mek.)
V4 (B75)	0,1 – 1 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täy- tekiteymiä, geelitäyttei- syyttä	osittain halkeamien rikkomat	säröilyä (valm.aik.), 13 – 20 kpl halkeamaa (yl.pakk.r.), AKR
V6 (BV69)	0,1 – 3 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täy- tekiteymiä	ehjät	2 kpl halkeamaa (alk.pakk.r.)
V8 (B75)	0,1 – 1 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täy- tekiteymiä, geelitäyttei- syyttä	pääosin ehjiä	säröilyä (valm.aik.), useita halkeamia (alk.pakk.r.), AKR
V14 (B75)	0,1 – 2 mm	ei varsinaista lisähuokostusta	ettringiitin kaltaisia täy- tekiteymiä, geelitäyttei- syyttä	pääosin ehjiä	säröilyä (valm.aik.), halkeilua (alk.pakk.r.), AKR

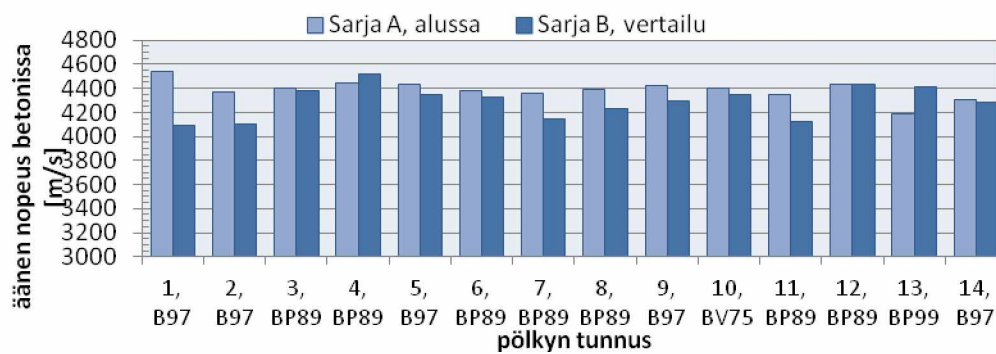
Ohuthietarkasteluissa ei pääsääntöisesti havaittu betonin suojahuokostusta, joten betonia ei voida pitää huokosrakenteensa puolesta kosteissa olosuhteissa pakkasenkestävänä. Mahdollisimman tiivis betoni sekä betonin lujuus kasvattavat kuitenkin betonin pakkasenkestävyyttä myös ilman suojahuokostusta. Käyttämättömiä rata-pölkkyjä lukuun ottamatta lähes kaikissa ohuthienäytteissä havaittiin huokosten täyteisyyttä, mikä viittaa siihen, että rakenteen kosteusrasitustaso käytön aikana on ollut suuri.

Ohuthietarkasteluissa havaittiin säröilyä tai mikrohalkeilua kaikissa käytössä olleissa ratapölkkyissä. Yleisesti havainnot viittasivat siihen, että halkeamat olivat syntyneet joko valmistuksen aikana tai käytön aikana mekaanisista rasituksista johtuen. Erän 2 pölkkyissä havaittiin myös alkavaa pakkasrapautumisen aiheuttamaa halkeilua osassa näytteistä. Erän 2 pölkkyissä havaittiin myös viitteitä alkalikiviainesreaktion yhteydessä syntyvästä geelimäisestä reaktiotuotteesta.

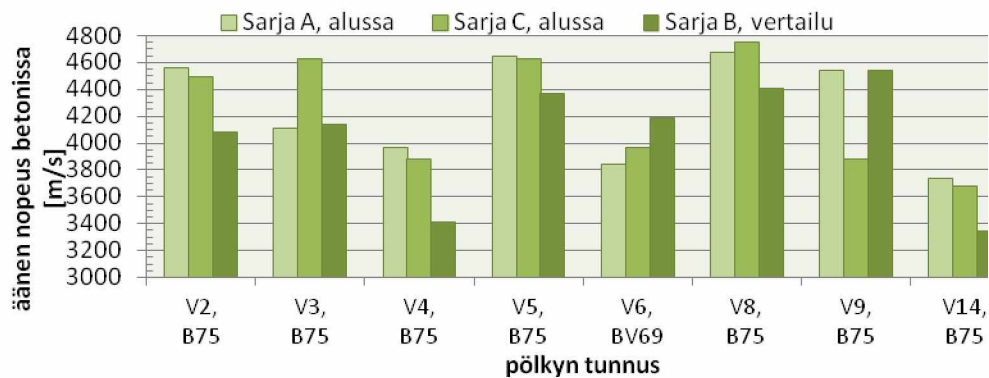
5.4.5 Jäädytys-sulatuskoe

Alkutilanne

Ultraäänen nopeus betonikoekappaleissa määritettiin kokeen aluksi näytteille, jotka olivat täysin kapillaarisesti vedellä kyllästettyjä. Alkutilanteen äänen nopeudet on esitetty kuvissa 5.14 ja 5.15. Erän 1 alkutilanteen äänen nopeudet asettuvat välille 4000 – 4600 m/s ja erän 2 äänen nopeudet välille 3300 – 4800 m/s.



Kuva 5.14 Erästä 1 ennen jäädytys-sulatuskoetta mitatut äänen nopeudet.

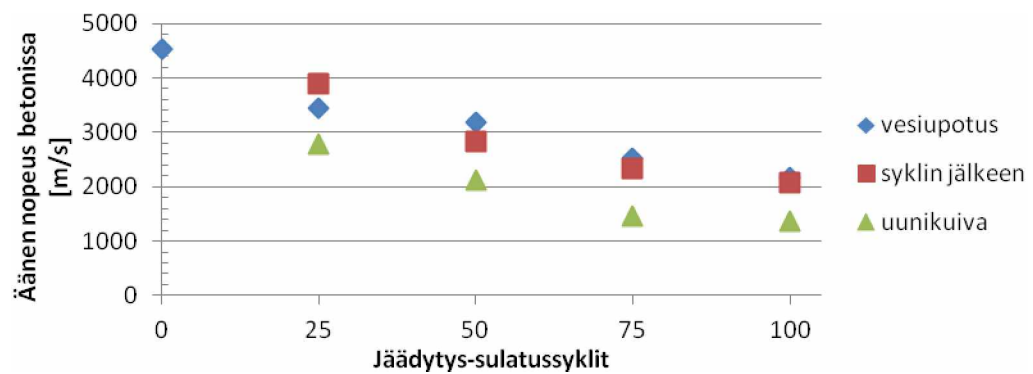


Kuva 5.15 Erästä 2 ennen jäädytys-sulatuskoetta mitatut äänen nopeudet. Pölkkyt V2, V3, V4 ja V14 olivat pölkkyjä silmämääräisesti arvioiden huonokuntoisia.

Keskimääräistä alhaisemmat äänennopeudet ennen jäädytys-sulatuskoetta näytesarjoissa V4, V6 ja V14 viittaavat todennäköisesti radassa tapahtuneeseen rapautumiseen. Ohuthienäytteiden perusteella juuri kyseisissä pölkkyissä oli merkkejä alkavasta pakkasrapautumisesta ja yleisestä pakkasrapautumisesta. Lisäksi nämä näytesarjat pärjäivät Vartiuksen radasta poistetuista pölkystä heikoiten pakkassuolakokeissa (luku 5.4.7.2).

Kosteuspitoisuuden vaikutus mittauksiin

Jäädytys-sulatuskokeen edetessä äänen nopeus mitattiin koekappaleista kolmessa kosteuspitoisuudessa: heti syklin jälkeen, kuivana ja täysin kapillaarisesti kyllästettynä. Seuraavassa kuvassa 5.16 on esitetty kosteuspitoisuuden vaikutus mittaustuloksiin kokeen edetessä.



Kuva 5.16. Betonin kosteuspitoisuuden vaikutus ultraäänimittaukseen. Esimerkkinä erän 1, sarjan A näyte 1.

Kosteuspitoisuuden vaikutus mittaustuloksiin on otettava huomioon, jos verrataan ultraäänimittausten tuloksia eri kosteuspitoisuuksissa mitatuista koekappaleista tai rakenteista. Tässä tutkimuksessa tulosten tarkastelussa otettiin huomioon lopulta täysin kapillaarisesti kyllästetyistä koekappaleista mitatut tulokset.

Erä 1: Maantieteellisen sijainnin perusteella hajautetut Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkyt

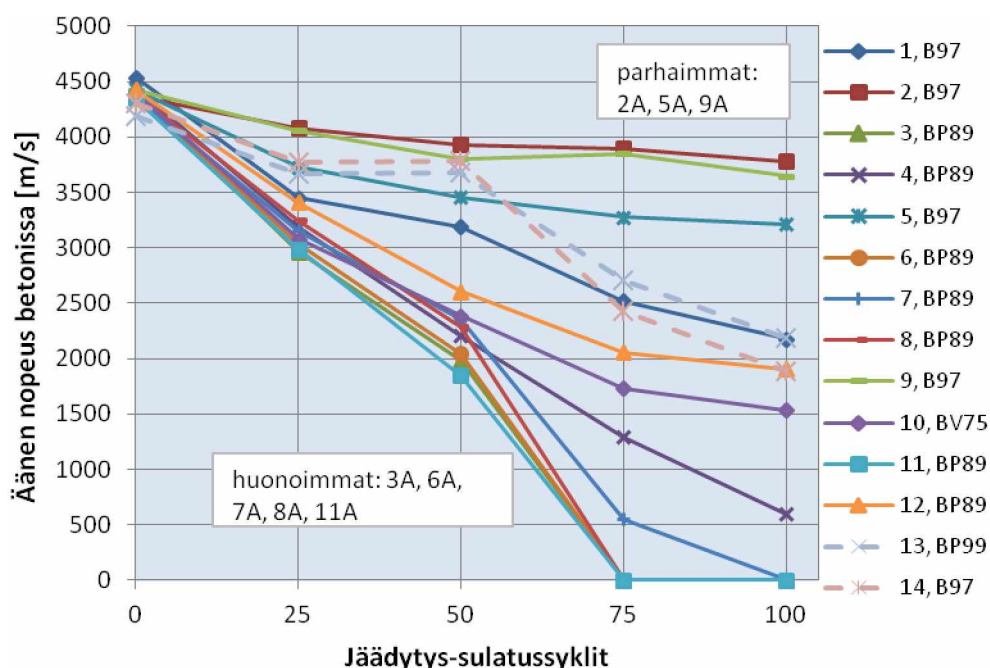
Erän 1 pölkyt ovat vuosilta 1991-1998 lukuunottamatta pölkyä 10, joka on valmistettu 1977. Lisäksi pölkyt 13 ja 14 ovat vuonna 2009 valmistettuja ja käyttämättömiä. Pölkyjen otos on hajautettu maantieteellisesti niin, että pohjoisimmat pölkyt ovat liikennepaikkaväliltä Tuomioja-Raahe, nro 2 sekä Komusta liikennepaikkaväliltä Iisalmi-Ylivieska, nro 5, ja eteläisimmät pölkyt ovat nro 11 Karjaa-Salo rataosuudella sekä nro 12 Lohjalla. Selviä viitteitä maantieteellisen sijainnin vaikutukseen rapautumisen etenemiseen ei havaittu. Suurempi merkitys esimerkiksi mikrohalkeamien syntyy voi olla eroilla rataosuuksien liikennemäärillä ja kunnossapitotasolla.

Taulukko 5.11. Ultraäänimittausten tulokset erän 1 jäädytys-sulatuskokeen aikana.

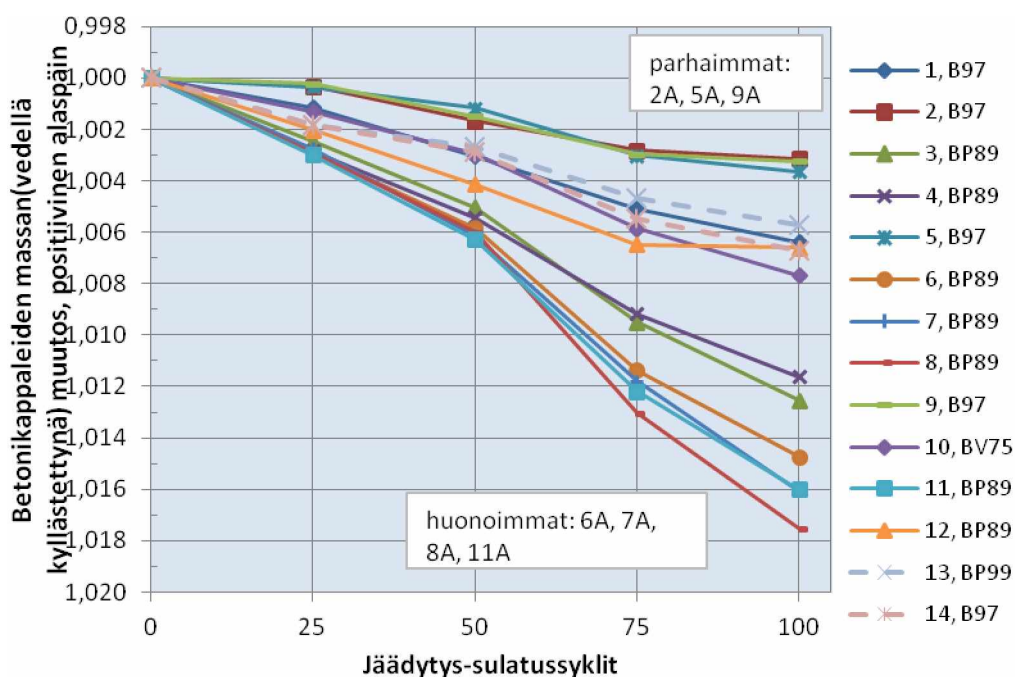
tunnus	Äänen nopeus betonissa jäädytys-sulatuskokeen edetessä [m/s]					shs
	alussa	25	50	75	100	
1A	4541,4	3449,8	3190,5	2517,4	2176,3	0,11
2A	4372,8	4084,1	3930,3	3899,7	3783,1	0,20
3A	4405,4	2967,0	1978,8	-	-	0,06
4A	4447,1	3190,5	2206,0	1290,6	599,6	0,14
5A	4432,3	3731,4	3458,2	3279,0	3212,3	0,16
6A	4383,9	3033,6	2046,1	-	-	0,05
7A	4362,7	3158,0	2352,7	550,1	-	0,02
8A	4394,4	3246,5	2287,9	-	-	0,14
9A	4426,5	4057,8	3803,3	3852,5	3649,5	0,24
10A	4405,5	3083,6	2388,9	1730,7	1533,3	0,14
11A	4351,1	2988,2	1845,6	-	-	0,06
12A	4430,3	3412,4	2607,7	2054,7	1907,2	0,07
13A	4189,8	3667,0	3677,3	2707,7	2186,6	0,07
14A	4301,5	3770,1	3784,1	2428,7	1888,7	0,22

Vertaamalla erän 1 ultraäänimittausten tuloksia ja äänen nopeuden heikkenemistä kokeen edetessä samoista koekappaleista määritettyihin suojahuokossuhteisiin voitiin todeta, että pölkyillä 3 ja 6 matala suojahuokossuhde viittasi selvästi nopeasti jäädytys-sulatuskokeen aikana syntyvään halkeiluun. Vastaavasti korkean/kohtalaisen suojahuokossuhteen pölkyissä 2, 5 ja 9 äänen nopeus säilyi paremmin kokeen aikana. Poikkeuksena osa näytteistä rapautui nopeammin, kuin mitattu suojahuokossuhde antaisi olettaa. Löytyi myös matalan suojahuokossuhteen pölkkyjä, jotka kestivät odotettua paremmin kokeessa.

Seuraavissa kuvissa on esitetty erän 1 koekappaleissa havaittu rapautuminen jäädytys-sulatuskokeen aikana sekä ultraäänimittausten mukaan (kuva 5.17) että kapillaarisesti kyllästettynä tehtyjen punnitusten mukaan (kuva 5.18).



Kuva 5.17 Ultraäänimittaukset erän 1 jäädytys-sulatuskokeen aikana.



Kuva 5.18 Punnitukset kapillaarisesti kyllästettynä erän 1 jäädytys-sulatuskokeiden aikana. Kokeen aikana koekappaleiden massat kasvoivat, kun betoniin syntyi uusia halkeamia, jotka täyttyivät vesiupotuksessa.

Erä 2: Vartiuksen rataosuuden pölkyt

Erän 2 pölkyt on kaikki valmistettu 1970 -luvulla ja kaikki ovat samalta Vartiuksen rataosuudelta suurin piirtein samalta korkeudelta kuin erän 1 Raahen pölky. Pölkyt valittiin kokeita varten niiden silmämääräisen kunnon perusteella niin, että otokseen

sattui sekä silmämääräisesti hyväkuntoisia että huonokuntoisia pölkkyjä. Silmämääräisesti huonokuntoiseksi arvioituja pölkkyjä olivat V2, V3, V4 ja V14.

Taulukko 5.12. Ultraäänimittausten tulokset erän 2 jäädytys-sulatuskokeen aikana (sarja A, 50 sykliä).

tunnus	Äänen nopeus betonissa jäädytys-sulatuskokeen edetessä [m/s]					shs
	alussa	25	50	-	-	
V2 A	4560,4	3174,6	2625,6			0,21
V3 A	4108,3	2356,3	626,8			0,10
V4 A	3966,7	2928,7	2716,2			0,11
V5 A	4651,2	3198,6	2785,6			0,23
V6 A	3844,0	2040,2	-			0,02
V8 A	4671,6	3475,3	3475,3			0,23
V9 A	4541,9	2970,8	2683,2			0,16
V14 A	3736,8	2234,3	772,3			0,05

Taulukko 5.13. Ultraäänimittausten tulokset erän 2 jäädytys-sulatuskokeen aikana (sarja C, 100 sykliä).

tunnus	Äänen nopeus betonissa jäädytys-sulatuskokeen edetessä [m/s]					shs
	alussa	25	50	75	100	
V2 C	4497,9	3150,6	2920,7	2094,3	818,9	0,21
V3 C	4626,4	3081,8	2064,1	-	-	0,10
V4 C	3878,3	2653,1	2161,3	607,1	-	0,11
V5 C	4631,0	3257,6	3329,8	2471,4	1074,6	0,23
V6 C	3962,8	2352,4	870,1	-	-	0,02
V8 C	4753,6	3487,6	3487,6	2666,4	1766,4	0,23
V9 C	3882,5	2952,5	2941,4	1882,7	707,5	0,16
V14 C	3681,3	2392,9	2212,7	736,5	-	0,05

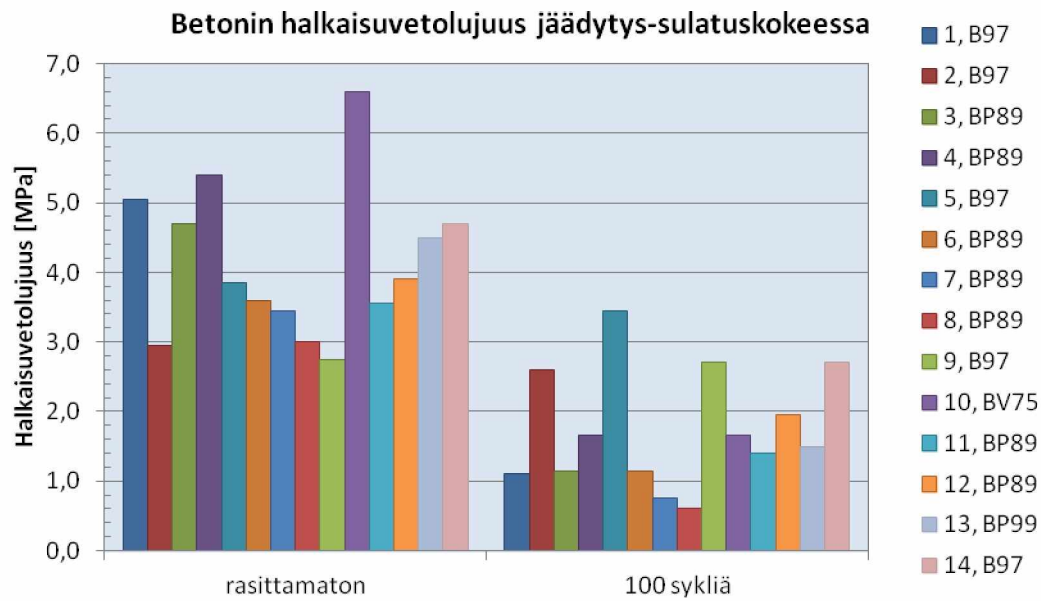
Silmämääräisesti huonokuntoiseksi arvioidut pölkkyt pärjäsivät myös jäädytys-sulatuskokeessa pääsääntöisesti huonosti. Pölkky V2 säilyi kokeessa kohtalaisen hyvin. Tästä pölkystä mitattu suojahuokossuhde oli korkea. Silmämääräisesti hyväkuntoisiksi arvioidut pölkkyt V5, V8 ja V9 kestivät myös jäädytys-sulatuskokeen hyvin. Kuvassa 5.19 olevat näytteet pölkystä V6 rapautui kokeessa voimakkaimmin huolimatta siitä, että pölkkyssä ei esiintynyt näkyvää rapautumista kokeen alussa. Ultraäänimittausten mukaan pölkky V6 oli kuitenkin kolmen huonoimman joukossa ja pölkyn betonin suojahuokossuhde oli olematon. V6:n pölkkytyyppi oli erän 2 muista pölkkyistä poikkeava ja myös betonin koostumus silmin nähden erilainen.



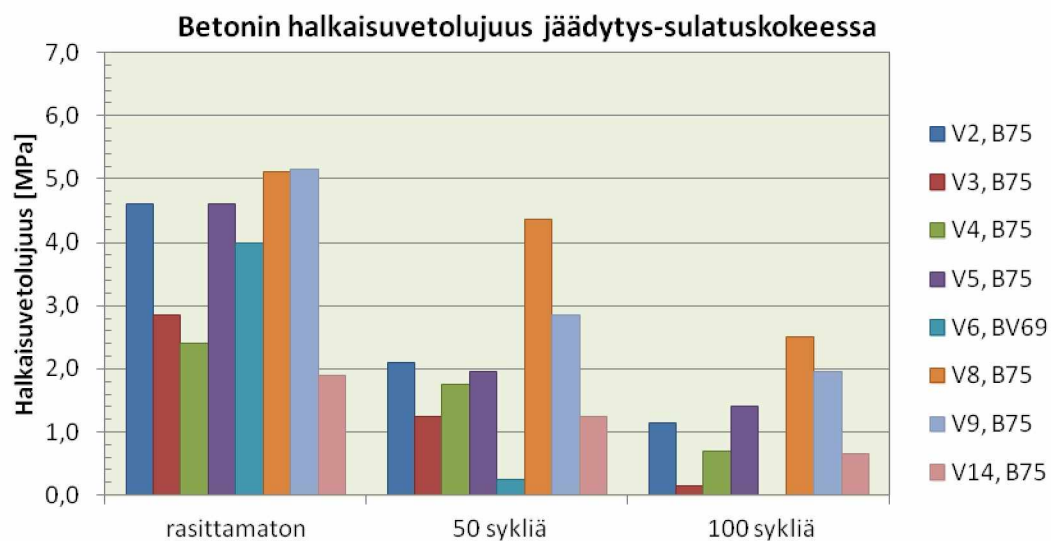
Kuva 5.19 Koekappaleet V6 A (vasemmalla) ja V6 C (oikealla) jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

Betonin halkaisuvetolujuus

Jäädytys-sulatuskokeeseen kuuluvaksi rinnakkaiskokeeksi valittiin lieeriökoekappaleille soveltuvana testimenetelmänä halkaisuvetolujuuden testaus sekä rasitetuista että vertailukoekappaleista. Betonin halkaisuvetolujuus mitattiin kokeen lopuksi, jotta rapautumista voitiin verrata myös rakenteen toimivuutta mittaavan ominaisuuden kautta. Jäädytys-sulatuskokeen päätyttyä koekappaleista testatut halkaisuvetolujuudet on esitetty kuvissa 5.20 ja 5.21. Jäljempänä tarkastellaan erityisesti lujuuden suhteellista heikentymistä alkutilanteeseen (vertailukoekappale) nähden (taulukko 5.14 ja taulukko 5.15).



Kuva 5.20 Erän 1 ratapölkkyjen betonin halkaisuvetolujuus 100 syklin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen sekä vertailukoekappaleista mitattuna. Koe-kappaleen 10 alkutilanteen tulokseen vaikuttivat näytteeseen jääneet jännepunokset, joten tulos on liian suuri.



Kuva 5.21 Erän 2 ratapölkkyjen betonin halkaisuvetolujuus 50 ja 100 syklin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen sekä vertailukoekappaleista mitattuna.

Taulukko 5.14 Erän 1 pakkasrasitettujen koekappaleiden halkaisuvetolujuuden suhteellinen heikentyminen vertailukoekappaleisiin nähden.

	rasittamaton	100 sykliä	muutos	huomioita
	[Mpa]	[Mpa]	%	
1, B97	5,05	1,10	-78 %	
2, B97	2,95	2,60	-12 %	
3, BP89	4,70	1,15	-76 %	
4, BP89	5,40	1,65	-69 %	
5, B97	3,85	3,45	-10 %	
6, BP89	3,60	1,15	-68 %	
7, BP89	3,45	0,75	-78 %	
8, BP89	3,00	0,60	-80 %	
9, B97	2,75	2,70	-2 %	
10, BV75	6,60	1,65	-75 %	jännepunokset häiritsivät koetta, rasittamaton tulos liian suuri
11, BP89	3,55	1,40	-61 %	
12, BP89	3,90	1,95	-50 %	
13, BP99	4,50	1,50	-67 %	
14, B97	4,70	2,70	-43 %	

Taulukko 5.15 Erän 2 pakkasrasitettujen koekappaleiden halkaisuvetolujuuden suhteellinen heikentyminen vertailukoekappaleisiin nähden.

	rasittamaton	50 sykliä	muutos	100 sykliä	muutos
	[Mpa]	[Mpa]	%	[Mpa]	%
V2, B75	4,60	2,10	-54 %	1,15	-75 %
V3, B75	2,85	1,25	-56 %	0,15	-95 %
V4, B75	2,40	1,75	-27 %	0,70	-71 %
V5, B75	4,60	1,95	-58 %	1,40	-70 %
V6, BV69	4,00	0,25	-94 %	0,00	-100 %
V8, B75	5,10	4,35	-15 %	2,50	-51 %
V9, B75	5,15	2,85	-45 %	1,95	-62 %
V14, B75	1,90	1,25	-34 %	0,65	-66 %

Mitattujen halkaisuvetolujuuksien perusteella kaikki koekappaleet lukuun ottamatta erän 1 kappaleita 2, 5 ja 9 heikkenivät selvästi jäädytys-sulatuskokeessa. Uudemmat erän 1 pölkyt pärjäsivät kokeessa yleisesti paremmin kuin vanhemmat erän 2 pölkyt.

5.4.6 Pakkassuolakokeet 2010

Pakkassuolakokeet tehtiin kohdassa 5.3.9 esitetyllä tavalla. Pakkasenkestävyysluku määritettiin yksittäisestä ratapölkystä otetun kolmen näytteen tilavuuden keskiarvon perusteella.

Pakkassuolakoetuloksia arvioitaessa on huomioitava käytetyn suolaliuoksen epäpuhtaudet (kohta 5.3.9). Epäpuhtaudet aiheuttivat erittäin voimakasta rapautumista reagoissaan käytetyn sementin tai kiviaineksen kanssa. Tätä voimakasta rapautumista ei olisi tapahtunut vähemmän epäpuhtauksia sisältävässä liuoksessa.

Kajaanissa sijainneelta käytöstä poistettujen ratapölkkyjen varastolta toimitetut (luku 2.3.2 BV75-ratapölkkyt saavuttivat yhtä näyte-erää lukuun ottamatta (taulukko 5.16) Esijännitettujen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (RHK 2008) asettaman pakkasenkestävyysluvun 25. Kokeessa 10 olleessa näyte-erässä pakkasenkestävyysluku oli ainoastaan 3, mikä tarkoittaa noin 33 % tilavuudenmuutosta. Aina 35 jäädytys-sulatussykliin saakka näyte-erän 10 tilavuuden muutos verrattuna toisiin BV75:stä tehtyihin kokeisiin oli lähes samansuuruista, eli alle 1 %. Tämän jälkeen rapautuminen kiihtyi voimakkaasti tilavuudenmuutoksen ollessa 45 syklin kohdalla lähes 16 % ja 50 syklin kohdalla 33 %. Mahdollisena selittävänä tekijänä voimakkaalle rapautumiselle saattoi olla näytteissä mahdollisesti olemassa olleet säröt. Säröt saattoivat aiheuttaa voimakkaan pakkassuolarasituksen kanssa näytteen tilavuuteen nähden suurehkojenkin betonikappaleiden irtoamisen. Täysin tämä ei kuitenkaan selitä suurta tilavuuden muutosta. Kyseisen näyte-erän betoni on mahdollisesti pakkasta kestävämmästä, mikäli suolaliuoksen epäpuhtaudet eivät aiheuttaneet kokeessa poikkeuksellisen voimakasta rapautumista. Muut BV75:stä otetut näyte-erät täyttivät asetetut kriteerit selkeästi keskimääräisen tilavuudenmuutoksen vaihdellessa 0,3-1,1 % välillä.

Taulukko 5.16 BV75-betoniratapölkkyjen pakkasenkestävyysluvut. Taulukossa oleva koe numero vastaa staattisissa pölkyn pään kuormituskokeissa käytettyä koenumeroa.

	BV75 Koe 3	BV75 Koe 6	BV75 Koe 7	BV75 Koe 8	BV75 Koe 9	BV75 Koe 10	BV75 Koe 11
Pakkasenkestävyysluku	139	317	137	88	247	3	99

Käyttämättömistä B97- ja BP99-ratapölkkyistä otetut näytteet rapautuivat erittäin voimakkaasti 10 - 25 jäädytys-sulatussyklin aikana ollen lähes täysin rapautuneita 25 syklin jälkeen. Rapautumisen etenemisen näkee selkeästi kuvista 62 ja 63, jotka on otettu 17 ja 25 syklin jälkeen. Voimakkaasta rapautumisesta huolimatta betonia ei voida ennen lisäkokeita luokitella pakkasta kestävämmäksi. Syynä tähän on pakkassuolakokeissa käytetyn suolan epäpuhtaudet (kohta 5.3.9), mitkä nykyään betonissa käytettävän sementin tai kiviaineksen kanssa saattavat aiheuttaa erittäin voimakkaan, mutta standardin mukaiseen kokeeseen kuulumattoman rapautumisreaktion.



Kuva 5.22 Rapautunut näyte-erä 17 jäädytys-sulatus syklin jälkeen.



Kuva 5.23 Rapautunut näyte-erä 25 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen.

Kajaanin käytöstä poistettujen ratapölkkyjen varastolta toimitetuista (luku 2.3.2 B63- ja B75-ratapölkkyistä otetut näytteet rapautuivat samankaltaisesti kuin käyttämättömistä ratapölkkyistä otetut näytteet. B63:sta otetut näytteet eivät olleet 10 pakas-suolasyklin jälkeen menettäneet tilavuudestaan paljoakaan, mutta jo 25 syklin jälkeen tilavuus oli pienentynyt noin 46 %. B75:stä otetut näytteet rapautuivat selkeästi hitaammin, sillä 25 syklin jälkeen niiden tilavuus oli pienentynyt 1,8-3,5 %, minkä jälkeen rapautuminen kiihtyi erittäin voimakkaasti. Tilavuuden muutos 35 syklin kohdalla vaihteli 75 %:sta lähes täysin rapautuneeseen. Myös B63- ja B75-ratapölkkyjen betonille jouduttiin tekemään lisäkokeita, jotta voidaan pois sulkea käytetyn suolan mahdollisesti aiheuttama voimakas rapautuminen.

Lisäkokeita tehtiin viidelle näytesarjalle. Taulukossa 5.17 esitettävät lisäkokeiden perusteella määritetyt pakkasenkestävyyksluvut täyttivät yhtä poikkeusta lukuun ottamatta teknisissä toimitusehdoissa (Ratahallintokeskus 2008) annetun pakkasenkestävyyksluvuvaatimuksen 25. B63-pölkkyllä pakkasenkestävyyksluku oli 18, joka vastaa

noin 5,5 % tilavuudenmuutosta. Saatujen koetulosten perusteella aikaisemmissa kokeissa havaittu voimakas rapautuminen johtui käytetystä suolasta, eikä pölkkyjen ominaisuuksista.

Taulukko 5.17 Lisäkokeiden perusteella määritetyt pakkasenkestävyysluvut.

	B97	BP99	BV75	B75	B63
Pakkasenkestävyysluku	31	30	36	43	18

5.4.7 Pakkassuolakokeet 2012

5.4.7.1 Parma ja Luja

Pakkassuolakokeita tehtiin radasta rapautumistutkimusta varten otetuille Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkyille taulukon 5.3 mukaisesti. Ratapölkkyt oli pyritty valitsemaan eri rasitusoloista. Lisäksi verrokiksi otettiin näytesarjat käyttämättömistä Lujan ja Parman vuonna 2009 valmistamista käyttämättömistä pölkyistä. Pakkassuolakokeita tehtiin yhteensä 14 kappaletta. Taulukko 5.18 esittää kokeissa syntyneet tilavuuden muutokset. Taulukossa on korostettu keltaisella ne näytesarjat, jotka ylittävät teknisissä toimitusehdoissa (Ratahallintokeskus 2008) asetetun 4 %:n tilavuudenmuutosvaatimuksen. Taulukko 5.19 esittää tilavuuden muutosten perusteella määritetyt pakkasenkestävyysluvut. Teknisten toimitusehtojen mukaisesti pakkasenkestävyysluvun tulee olla yli 25. Pakkasenkestävyysluvun ollessa 25 on näytesarjan tilavuus muuttunut 4 %.

Taulukko 5.18 Parman ja Lujan alkupään tuotannon ratapölkkyjen pakkassuolakokeiden tulokset. Taulukossa esitetyt arvot ovat tilavuuden muutoksia prosentteina.

	0	10	25	35	45	50
1. B97	0	0	0,2	0,7	1,4	1,7
2. B97	0	0	0,3	0,7	1,4	1,6
3. BP89	0	0	0,1	0,3	0,6	0,8
4. BP89	0	-0,1	0	0,1	0,3	0,6
5. B97	0	0	0,2	0,6	1,3	1,7
6. BP89	0	-0,3	0,1	1,7	17,8	54,8
7. BP89	0	-0,2	0,6	1,1	2	10,0
8. BP89	0	-0,1	0,2	0,6	1,6	2,3
9. B97	0	-0,1	0,3	0,9	1,7	1,9
10. BV75	0	0	0,5	1,1	1,7	2,1
11. BP89	0	0,1	0,3	1,7	4,4	12,5
12. BP89	0	0	0,1	0,4	0,8	1,2
13. BP99	0	-0,1	0,1	0,3	0,9	1,2
14. B97	0	-0,1	0,2	0,6	1,7	2,4

Taulukko 5.19 Parman ja Lujan alkupään tuotannon ratapölkkyjen pakkassuolakokeiden tulosten perusteella määritetyt pakkasenkestävyyshluvut.

	1. B97	2. B97	3. BP89	4. BP89	5. B97	6. BP89	7. BP89
Pakkasenkestävyyshluku	59	63	125	167	59	2	10

	8. BP89	9. B97	10. BV75	11. BP89	12. BP89	13. BP99	14. B97
Pakkasenkestävyyshluku	43	53	48	8	83	83	42

Taulukosta 5.18 voidaan havaita, että useimmat näytesarjat täyttivät selkeästi Betoni-ratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa asetetun tilavuudenmuutosvaatimuksen. Kokeissa oli mukana kuitenkin kolme näytesarjaa, jotka eivät täyttäneet tilavuudenmuutosvaatimusta. Kuva 5.24 esittää kokeen numero kaksi näytesarjan 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen ja kuva 5.25 esittää kokeen numero 11 näytesarjan 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen. Kokeessa kaksi tilavuudenmuutoksen keskiarvo oli hieman alle kaksi prosenttia ja kokeessa 11 tilavuudenmuutos oli yli 12 prosenttia.



Kuva 5.24 Kokeen 2 näytesarja 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen.



Kuva 5.25 Kokeen 11 näytesarja 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen.

Pakkassuolakokeiden tulosten perusteella Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyt olivat pääsääntöisesti hyvin pakkas-suolarasituksen kestäviä ottaen erityisesti huomioon, että pölkkyt ovat olleet raiteissa 15-20 vuotta. Kolmessa näytesarjassa (ko-

keet 6, 7 ja 11) havaittu voimakas rapautuminen saattaa johtua jostain muusta rapautumismekanismista, kuin pakkasrapautumisesta. Syynä tähän on kokeessa havaittu rapautumisnopeus, joka oli erittäin voimakasta vasta aivan kokeen viimeisten syklien aikana. Havaintoa tukee osaltaan myös se, että kokeiden 6 ja 11 pölkyistä otetuissa ohuthienäytteissä (kappale 5.4.4) ei ollut havaittavissa pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua. Näin ollen kokeiden 6, 7 ja 11 pölkköjen betonia ei voida täydellä varmuudella sanoa pakkasta kestävämmäksi, joskin teknisten toimitusehtojen kriteerin (Ratahallintokeskus 2008) nojalla ne sitä ovat.

5.4.7.2 Vartius

Vartiuksen radasta poistetuista pölkyistä valittiin kahdeksan pölkyä rapautumistutkimuksiin. Kaikki radasta poistetut pölkyt oli valmistettu 1975 ja pölkyt sisälsivät niin hyvä- kuin huonokuntoisia pölkyjä. Rapautumistutkimuksiin valitut pölkyt sisälsivät silmämääräisesti arvioituna hyväkuntoisia, lievästi/kohtalaisesti vaurioituneita ja huonokuntoisia pölkyjä. Tutkimusten tavoitteena oli arvioida betonin ominaisuuksien yhteyttä mahdollisiin vaurioihin. Taulukko 5.20 esittää Vartiuksen radasta poistettujen pölkköjen pakkassuolakokeiden tilavuuden muutokset prosentteina ja Taulukko 5.21 esittää tilavuudenmuutoksen perusteella määritetyt pakkasenkestävyysluvut. Jokaisen pöllyn kohdalla oleva tilavuudenmuutos on pölkystä otettujen kolmen näytteen tilavuudenmuutoksen keskiarvo.

Taulukko 5.20 Vartiuksen radasta poistettujen ratapölkkyjen pakkassuolakokeiden tulokset. Taulukossa esitetyt arvot ovat tilavuuden muutoksia prosentteina.

	0	10	25	35	45	50
V2 (B75)	0	0,1	0,6	1,1	1,8	2,5
V3 (B75)	0	0,2	1,0	1,9	2,7	3,6
V4 (B75)	0	0,6	2,8	4,6	5,6	7,5
V5 (B75)	0	0,2	1,1	2,2	3,3	4,4
V6 (BV69)	0	4,6	10,7	15,1	20,3	24,2
V8 (B75)	0	-0,0	0,1	0,7	1,3	2,0
V9 (B75)	0	-0,1	0,5	1,4	2,6	3,8
V14 (B75)	0	0,3	2,2	3,6	5,1	6,5

Taulukko 5.21 Vartiuksen radasta poistettujen ratapölkkyjen pakkassuolakokeiden tulosten perusteella määritetyt pakkasenkestävyysluvut.

	V2 (B75)	V3 (B75)	V4 (B75)	V5 (B75)	V6 (BV69)	V8 (B75)	V9 (B75)	V14 (B75)
Pakkasenkestävyysluku	39	28	13	23	4	51	27	15

Taulukoista 5.20 ja 5.21 voidaan havaita, että kahdeksasta näytteestä neljä eivät täytäneet Betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa uusille pölkyille asetettua tilavuudenmuutosvaatimusta. Toimitusehdoissa uusien ratapölkkyjen pakkasenkestävyysluvun minimiarvoksi on asetettu 25, joka vastaa neljän prosenttiyksikön tilavuudenmuutosta. Näytesarja V6 (BV69) rapautui selkeästi muita näytesarjoja nopeammin. Neljän prosentin tilavuuden muutos saavutettiin jo 10 syklin kohdalla. Silmämääräisesti arvioituna kokeen V6 ratapölkky oli kuitenkin hyväkuntoinen. Parhaiten kokeessa pärjasi kokeen V8 (B75) pölkyistä otetut näytteet. Kuva 5.26 esittää ko-

keen V6 näytteet 50 syklin jälkeen ja kuva 5.27 kokeen V8 näytteet 50 syklin jälkeen. Vertailemalla taulukkoa 5.2 taulukkoon 5.20 voidaan havaita, että silmämääräisen kunnon arvioinnilla ei ole selkeää yhteyttä pakkas-suolakokeesta saatujen tulosten kanssa. Huomion arvoista on kuitenkin se, että pakkassuolakokeissa V5 näytteitä lukuun ottamatta heikoiten pärjäsivät ne näytesarjat, joiden betonin tiivistymisaste oli arvioitu silmämääräisesti tiiveimmäksi. Myös voimakkaasti rapautuneiden BP89-pölkyistä otettujen näytesarjojen (koe 6 ja 11 luku 5.4.7.1) betoni oli silmämääräisesti betonin tiiveyttä arvioiden tiivistyneimpiä. On syytä kuitenkin muistaa, että silmämääräisesti arvioiduissa tiivistymisasteissa ei ollut suurta eroa eri näytesarjojen kesken.



Kuva 5.26 Kokeen V6 (BV69) näytteet pakkassuolakokeen jälkeen.



Kuva 5.27 Kokeen V8 (B75) näytteet pakkassuolakokeen jälkeen. Vasemmanpuolimaisen näytteen yläpinnassa näkyvä halkeama oli olemassa jo ennen jäädytys-sulatussyklejä.

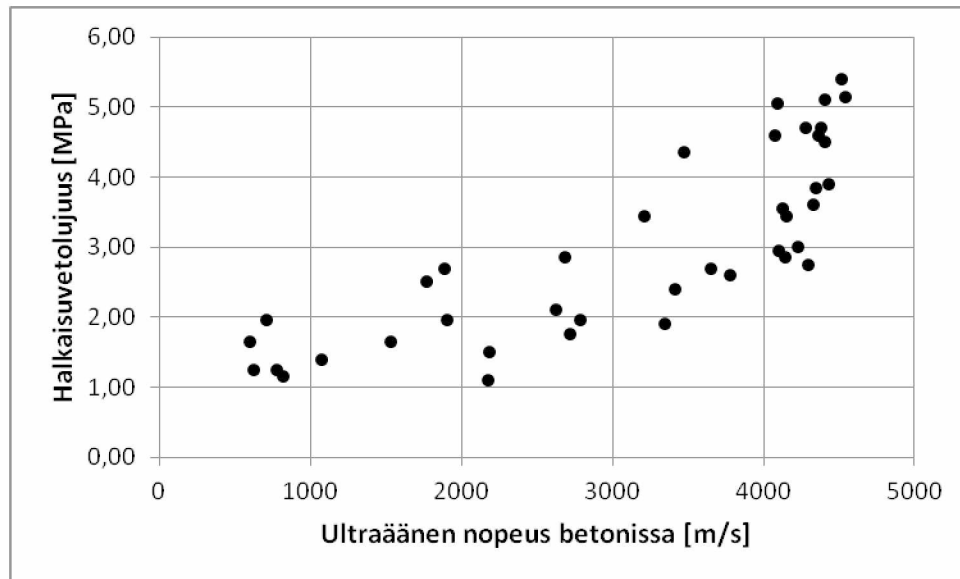
5.5 Yhteenveto tuloksista

Betonisille ratapölkkyille tehtiin kattavasti betonin materiaaliominaisuuksia mittaavia kokeita. Sekä punnituskokeiden että ohuthietarkastelujen perusteella ratapölkkyjen betonia ei oltu yleisesti suojahuokostettu tai suojahuokostus ei ollut riittävä, mikä vaikuttaa suoraan pölkyn säilyvyyteen kosteissa olosuhteissa. Ratapölkkyissä käytetty alhainen vesi-sementtisuhde ja korkeampi betonin lujuus sekä sitä myötä muodostuva matalampi huokoisuus toisaalta edesauttavat pakkasenkestävyyttä. Punnituskokeiden perusteella ratapölkkyjen betoni oli keskimääräistä tiiviimpää (kapillaarihuokoisuus luokkaa 9–11 % tilavuudesta). Ohuthietutkimuksissa tehdyt havainnot viittaavat siihen, että ratapölkkyjen kosteusrasitustaso käytön aikana on ollut suuri, mutta viitteitä pakkasrapautumisesta havaittiin vasta vanhimmissa, vuonna 1975 valmistetuissa ratapölkkyissä. Käytössä olleissa ratapölkkyissä esiintyi yleisesti mekaanisista rasituksista tai valmistuksesta johtuvaa mikrohalkeilua, joten myös säilyvystarkasteluissa rakennetta tulisi käsitellä halkeilleena betonina.

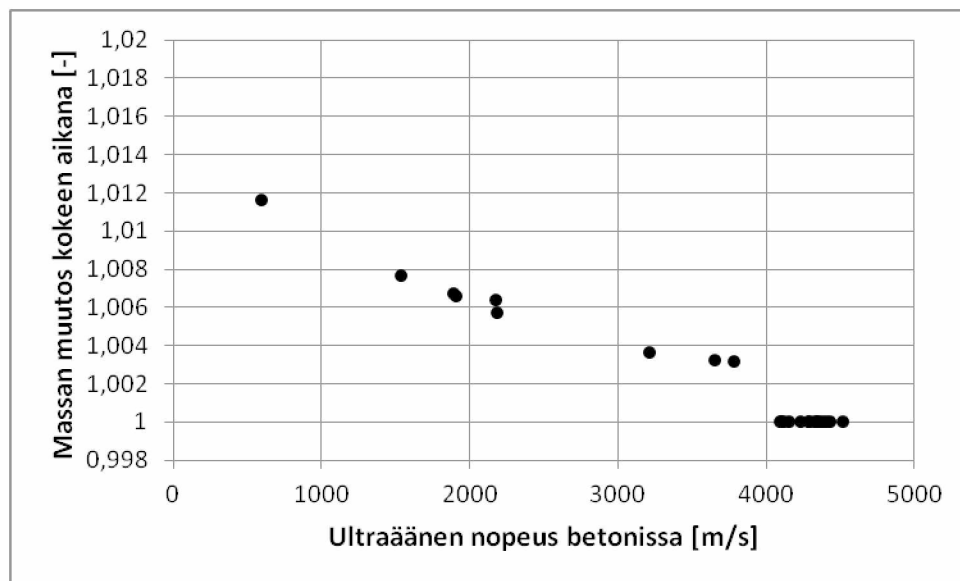
Ratapölkkyjen betonin karbonatisoituminen on hyvin hidasta johtuen joko betonin suhteituksesta tai jatkuvasti kosteista olosuhteista. Pölkyn alapinnasta mitattiin yleisesti suurempia karbonatisoitumissyvyyskuksia kuin yläpinnasta, mutta alapinnassakin karbonatisoituminen oli hyvin hidasta. Käytännössä raudoitukselle on olemassa korroosiosuoja karbonatisoitumisen aiheuttamaa korroosiota vastaan. Ratapölkkyissä esiintyi verrattain paljon mikrohalkeamia, jotka voivat kiihdyttää karbonatisoitumisen etenemistä paikallisesti tai tarjota mahdollisille klorideille pääsyn raudoituksen läheisyyteen. Suuren kloridirasituksen alaisena halkeamien merkitys korostuu, koska kloridikorroosio esiintyy pistemäisenä. Kloridirasitusta voi esiintyä ratapölkkyissä lähinnä tasoristeyksissä.

Jäädytys-sulatuskokeiden yhteydessä tehtiin ultraäänen etenemisnopeuden mittauksia koekappaleiden läpi ja verrattiin niitä punnitustuloksiin sekä halkaisuvetolujuuden kehitykseen. Ultraäänimittausten tarkoitus oli päästä seuraamaan ainetta rikkomattomalla menetelmällä betonikoekappaleiden rapautumisen etenemistä kokeen aikana. Tyypillisesti kappaleissa, joista oli mitattu korkea suojahuokossuhde, ultraäänin nopeus säilyi korkeana koko jäädytys-sulatuskokeen ajan. Näissä pölkkyissä (Erä 1: 2,5,9) myös halkaisuvetolujuus oli parhaiten säilynyt. Vastaavasti kappaleissa, joissa ultraäänin nopeus heikkeni eniten kokeen aikana (Erä 1: 3,6,8), myös jäännöshalkaisuvetolujuus oli matala. Kokeen aikana rapautuneilla koekappaleilla havaittiin rapautumisen kiihtyvän hieman 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen.

Ultraäänimittauksista saatiin myös tietoa sen käytettävyydestä betonisen ratapölkyn kunnon tutkimiseen ainetta rikkomattomana menetelmänä. Tulosten perusteella ultraäänimittauksilla saadaan selville vastaavia tuloksia kuin jäännöslujuutta testaamalla (kuva 5.28) tai gravimetrisillä menetelmillä (kuva 5.29). Mittausmenetelmä on kuitenkin äärimmäisen herkkä häiriöille sekä mittausmenetelmässä (lähettimen ja vastaanottimen kontakti ja paine, mittauskohta, läpäisymatka) että materiaalissa (kosteuspitoisuus).



Kuva 5.28. Mitattujen halkaisuvetolujuuden ja ultraäänen nopeuden välinen yhteys.



Kuva 5.29. Punnitustulosten ja ultraäänen nopeuden välinen yhteys.

Vuonna 2010 tehdyissä pakkassuolakokeissa käytetty merisuola aiheutti voimakkaan ja kokeisiin kuulumattoman näytesarjojen rapautumisen uusissa B97- ja BP99-pölkkyissä käytettävässä betonissa. Myös 70-luvulla valmistettujen B63- ja B75-pölkkyjen betoni rapautui voimakkaasti. Sen sijaan 70-luvulla valmistettujen Bv75-pölkkyjen betoni kesti merisuolan erittäin hyvin. Seitsemästä BV75-pölkkyistä otetusta näyte-erästä kuuden tilavuudenmuutos oli vain noin prosentin luokkaa ja ainoastaan yhdessä tapahtui merkittävää rapautumista. Väärästä suolasta johtuen kokeiden tuloksista ei kuitenkaan voida tehdä arvioita betonin rapautumisalttiudesta. Pakkassuolakoe tehtiin uudelleen viidelle näytesarjalle ja suolana käytettiin standardin SFS-5449 vaatimusten mukaisesti natriumkloridia. Uusituissa pakkassuolakokeissa ei havaittu poikkeuksellisen voimakasta rapautumista. B97-, BP99- BV75- ja B75-pölkkyistä otetuissa näytteissä tilavuudenmuutos oli noin 2-3 %. Näin ollen ne täyttivät betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa (Ratahallintokeskus 2008) asetetun vaatimuksen. Ainoastaan B63-pölkystä otettu näytesarja ei täyttänyt tilavuudenmuu-

tosvaatimusta. Näytesarjan tilavuudenmuutos oli noin 5,5 % vaatimuksen ollessa 4 %.

Vuonna 2012 tutkittavana oli Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyjä. Pölkkyt olivat olleet radassa noin 15-20 vuotta ja kohteet, joista pölkkyt toimitettiin, sijaitsivat eri puolilla Suomea. Parman ja Lujan alkupään tuotannon (Erä 1) pölkkyistä otetut näytesarjat kestivät enimmäkseen hyvin pakkassuolakokeen rasituksen. Pienimmät tilavuudenmuutokset olivat BP89-pölkkyillä (koe 3 ja 4). Tilavuudenmuutokset olivat molemmilla näytesarjoilla alle yhden prosentin. Lujan Bg7-pölkkyillä tilavuudenmuutos oli 1,6-1,9 % näytesarjasta riippuen. Tutkittavana oli myös kolme näytesarjaa, joiden tilavuudenmuutos oli yli sallitun 4 %. Kaikki näytesarja, jotka eivät täyttäneet vaatimusta, oli otettu BP89-pölkkyistä (kokeet 6, 7 ja 8). Voimakkaimmin rapautuneen näytesarjan (koe 6) tilavuudenmuutos oli kokeen päätyttyä yli 50 prosenttia. On kuitenkin mahdollista, että kokeissa havaittu voimakas rapautuminen ei kuvaa välttämättä erittäin huonoa pakkasenkestävyyttä vaan rapautumismekanismi on jokin toinen. Rapautuminen oli erittäin nopeaa vasta aivan kokeen lopussa. Esimerkiksi kokeessa 7 näytesarjan tilavuudenmuutos oli 45 jäädytys-sulatussyklin jälkeen noin 2 %, mutta tilavuudenmuutos 50 jäädytys-sulatussyklin jälkeen oli jo 10 %. Huomion arvoista on myös se, että kokeen 7 ja 8 pölkkyt olivat samaan aikaan valmistettuja ja ne sijaitsivat lähes vierekkäin raiteessa, joten ne ovat mahdollisesti jopa samasta valmistuserästä. Kuitenkin kokeen 8 pölkystä otetun näytesarjan tilavuudenmuutos oli vain hieman yli 2 %. Lisäksi pakkassuolakokeessa havaitun voimakkaan rapautumisen kanssa ristiriidassa on ohuthienäytteiden tulokset. Yhdestäkään Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkystä otetusta näytteestä ei löydetty merkkejä pakkasrapautumisesta.

Kahdeksasta Vartiuksen radasta poistetusta pölkystä otettiin näytesarjat pakkassuolakokeita varten. Näytesarjoja otettiin silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisista ja huonokuntoisista pölkkyistä. Tutkittavana oli seitsemän näytesarjaa B75-pölkkyistä ja yksi BV69-pölkystä. Kaikki pölkkyt oli valmistettu 1975. Näytesarjoista neljässä tilavuudenmuutos oli 2-3,8 % ja lopuilla näytteillä tilavuudenmuutos ylitti 4 %. Suurin tilavuudenmuutos oli BV69-pölkystä otetuilla näytteillä. Näytteiden tilavuus oli muuttunut jo 10 jäädytys-sulatussyklin jälkeen lähes 5 % ja kokeen päätyttyä yli 24 %. Pölkky oli kuitenkin silmämääräisesti arvioituna hyväkuntoinen ja ohuthienäytteissä oli merkkejä vain alkavasta pakkasrapautumisesta. Tilavuudenmuutos B75-pölkkyissä, jotka ei täyttäneet tilavuudenmuutosvaatimusta, oli 4,4-7,5 %. Kokeiden V4, V6 ja V14 pölkkyissä oli ohuthienäytteiden perusteella merkkejä pakkasrapautumisesta. Samoista pölkkyistä otetut näytteet rapautuivat myös eniten pakkassuolakokeissa ja äänen nopeudet betonissa olivat kaikista näytesarjoista matalimmat. Näin ollen radassa tapahtuneella pakkasrapautumisella voidaan katsoa olevan selkeä merkitys pakkassuolakokeista saataviin tuloksiin.

Taulukko 5.22 ja taulukko 5.23 esittää rapautumistutkimuksien eri kokeissa heikoiten pärjänneet pölkkyt. Taulukon vasemmanpuoleisessa sarakkeessa on kokeen numero, jonka näytesarja pärjäsi heikoiten, eli omasi alimman suojahuokossuhteen, suurimman kapillaarihuokoisuuden, alimman äänen nopeuden betonissa ennen jäädytys-sulatuskokeita, suurimman halkaisuvetolujuuden muutoksen jäädytys-sulatuskokeissa, suurimman äänennopeuden muutoksen betonissa jäädytys-sulatuskokeissa ja suurimman tilavuuden muutoksen pakkassuolakokeissa. Silmämääräisesti parhaan tiivistymisasteen omaavat näytesarjat ovat kuitenkin taulukossa vasemmanpuolimmaisina. Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyissä ei ollut selkeästi heikointa näytesarjaa, joskin kokeen 6, 7, 8 ja 11 olivat useimmin viiden heikoimman näytesarja

joukossa. Tämä selittyy osittain sillä, että Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkkyistä otettujen näytesarjojen erot olivat suhteellisen pieniä eri kokeissa. Sen sijaan Vartiuksen radasta poistettujen pölkkyjen näytesarjoista heikoiten pärjäsikin kokeen V6 näytesarja. Myös näytesarjat kokeissa V3, V4 ja V14 ovat lähes joka kokeessa neljän huonoimman näytesarjan joukossa.

Taulukko 5.22 Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkkyt, jotka pärjäsivät heikoiten rapautumistutkimuksen eri kokeissa. Taulukon numero vastaa kokeen numeroa.

	Järjestyksessä heikoimmat näytteet (heikoin = 1.)				
	1.	2.	3.	4.	5.
Tiivistymisaste silmämääräisesti (tiiveimmät)	11	12	3	6	8
Suojahuokossuhde	7	6	3	11	12 ja 13
Kapillaarihuokoisuus	5	9	2	13	7
Äänennopeus ennen jäädytys-sulatuskoetta	11	7	2	14	8
Halkaisuvetolujuuden muutos	8	7 ja 1	3	4	6
Äänennopeuden muutos jäädytys-sulatuskokeessa	11	3	6	8	4
Tilavuuden muutos pakkassuolakokeissa	6	11	7	8	14

Taulukko 5.23 Vartiuksen radasta poistetut pölkkyt, jotka pärjäsivät heikoiten rapautumistutkimuksen eri kokeissa. Taulukon numero vastaa kokeen numeroa.

	Järjestyksessä heikoimmat näytteet (heikoin = 1.)			
	1.	2.	3.	4.
Tiivistymisaste silmämääräisesti (tiiveimmät)	V6	V4	V14	V3
Suojahuokossuhde	V6	V14	V3	V4
Kapillaarihuokoisuus	V6	V14	V3	V2
Äänennopeus ennen jäädytys-sulatuskoetta	V14	V4	V6	V3
Halkaisuvetolujuuden muutos jäädytys-sulatuskokeessa	V6	V3	V2	V4
Äänennopeuden muutos jäädytys-sulatuskokeessa	V6	V3	V14	V4
Tilavuuden muutos pakkassuolakokeissa	V6	V4	V14	V5

Ratapölkkyjen rapautumisalttiutta ja rapautumista arvioitaessa on syytä huomata, että suurin osa kokeissa olleista pölkkyistä oli 15-38 vuotta radassa olleita. Silti niistä saadut koetulokset ovat vähintään tyydyttäviä verrattuna käyttämättömistä pölkkyistä saatuihin koetuloksiin. Käytössä olleiden pölkkyjen rapautumisalttiutta lisää myös mahdolliset mekaanisten rasitusten aikaansaamat säröt. Toisaalta pitää muistaa myös se, että mikäli 70-luvulla rataa asennetussa pölkkyssä on ollut erittäin rapautumisaltista betonia esimerkiksi ettringiitin johdosta, on nämä rapautumisalttiit pölkkyt todennäköisesti jouduttu vaihtamaan uusiin jo vuosia sitten. Näin ollen tutkimuksiin saatujen pölkkyjen betoni ei todennäköisesti ole heikkolaatuista verrattuna 70-luvun pölkkyjen keskimääräiseen betonin laatuun.

6 Yhteenveto ja pohdinta

6.1 Ratapölkkyjen kuormituskäyttäytyminen laboratoriossa

6.1.1 Kuormituskoeohjelma

Työssä kuormitettiin uusien ja eri-ikäisten radasta poistettujen betoniratapölkkyjen päitä ja keskiosia staattisesti, dynaamisesti ja väsyttäen. Pölkyn päille tehtiin 23 staattista kuormituskoetta, 4 dynaamista kuormituskoetta ja 8 väsytskuormituskoetta. Vastaavasti pölkyn keskiosalle tehtiin 24 staattista kuormituskoetta, 4 dynaamista kuormituskoetta ja 3 väsytskuormituskoetta. Testattuihin ratapölkkyihin kuului uusien BP99- ja B97-ratapölkkyjen lisäksi Kajaanissa sijaitsevalta raiteesta poistettujen ratapölkkyjen varastolta saatuja erikuntoisia B63-, B75- ja BV75-ratapölkkyjä, Vihannissa radassa ollessaan raiteen keskeltä haljenneita B97-ratapölkkyjä sekä Vartiuksen radasta poistettuja, myös varsin huonokuntoisia yksilöitä sisältäviä B75- ja BV69-ratapölkkyjä. Kuormituskokeiden tuloksia tarkasteltiin myös vertailulaskelmin.

6.1.2 Halkeamat ja niiden merkitys

Jokaisessa kuormittavaksi valitussa käytöstä poistetussa ratapölkkyssä oli kiskon lepopinnan kohdalla jo olemassa oleva pystysuuntainen halkeama. Halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja ne pystyttiin havaitsemaan pölkyn sivuilta usein vasta kuormien noston yhteydessä. Vihannista raiteesta toimitetuissa pölkkyissä oli halkeamia ratapölkyn yläpinnalla raiteen keskellä. Haljenneiden ratapölkkyjen punoksissa ei kuitenkaan havaittu korroosiota. Tätä selittää se, että halkeaman synnyttävän yksittäisen kuormitushuipun jälkeen halkeama pysyy esijännityksen johdosta kuitenkin suljettuna.

Keskiosan kuormituskokeessa Vihannissa radassa haljenneiden pölkkyjen taipumat olivat kuormien kasvaessa selkeästi suurempia ja näin ollen jäykkyudet pienempiä halkeilemattomiin pölkkyihin verrattuna. Vartiuksen B75-pölkkyjen jäykkyys oli samaa suuruusluokkaa kuin Vihannissa halkeilleiden B97-pölkkyjen. Esimerkiksi 50 kN kuormitustasolla Vihannissa radassa haljenneiden pölkkyjen ja Vartiuksen pölkkyjen taipumat olivat noin kaksinkertaiset (1 mm => 2 mm) verrattuna halkeilemattomiin ratapölkkyihin. Radassa pölkkyihin kohdistuvat rasitukset ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin kuormituskokeessa 50 kN kuormalla ratapölkkyyn kohdistuvat rasitukset (vrt. luku 6.3.7). Esimerkiksi 20-30 kN kuormitustasolla haljenneiden ja halkeamattomien pölkkyjen taipumien suuruudet olivat hyvin lähellä toisiaan. Täten pienempi jäykkyys ei todennäköisesti aiheuta pölkyn käytettävyydelle ongelmia, sillä radassa pölkkyyn kohdistuva kuorma aikaansaa niin pienen taipuman, että esimerkiksi raideleveys pysyy ongelmitta sallituissa rajoissa.

6.1.3 Väsytytys

Pölkyn pään väsytskuormituskokeissa selkeää väsymistä havaittiin suhteellisen korkeilla kuormitustasoilla. Ratapölkkyt murtuivat alle 200000 kuormitussyklin aikana, kun kuormitustaso oli 195 kN tai enemmän. Kyseinen 195 kN kuormitustaso on noin 57 % staattisesta murtokuormasta. Alhaisemmilla kuormitustasoilla väsytskuormitetuille pölkkyille väsytskokeen jälkeen tehdyissä staattisissa kuormituskokeissa havaittiin hieman alentuneita murtokuormia verrattuna väsytskuormittamattomaan

pölkkyyn. Alentuneiden murtokuormien perusteella väsymistä on saattanut tapahtua jo 150 kN kuormitustasoilla, joskin alentuneet murtokuormat saattavat osittain selittyä pölkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Huomionarvoista on kuitenkin se, että väsytyskuormituskokeissa pölkyihin kohdistunut taivutusmomenttirasitus on suuri verrattuna radassa pölkkyyn kohdistuvaan taivutusrasitukseen (vrt. kohta 6.3.2). Myös pölkyn keskiosan kuormituskokeissa oli havaittavissa se, että selkeää väsymistä aikaansaava rasitus on kohtalaisen suuri verrattuna radassa pääsääntöisesti pölkkyyn kohdistuviin rasituksiin. Näin ollen voidaan arvioida, että pölkkyjen väsyminen ei pääsääntöisesti käytännössä aiheuta ongelmia (vrt. kohta 6.3.7). Väsytyskuormituskokeiden tulosten perusteella luotiin nykyisin valmistettaville ratapölkyille pölkyn kohtaaman rasitustason ja pölkyn kestämän kuormituskertamäärän välistä yhteyttä kuvaava väsymismalli.

6.1.4 Kuormituskoetulosten yleistys

Ratapölkyn pään kuormituskokeissa Bg7- ja BP99-ratapölkkyt täyttivät standardin SFS-EN 13230-2 asettamat kriteerit hyvin ja BV75-ratapölkkyt niiden ikä huomioiden erittäin hyvin. B63- ja B75-pölkkyt kestivät selkeästi heikommin muihin testattuihin pölkkytyyppeihin verrattuna, mutta silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden niidenkin kuormankantokyky oli vähintäänkin tyydyttävä.

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeista voidaan todeta, että ratapölkyn keskiosan kuormituskokeiden perusteella BV75-pölkkyt ovat vähintään yhtä kestäviä kuin nykyään Suomen rataverkolle hankittavat Bg7- ja BP99-pölkkyt. Myös B63- ja B75-ratapölkkyt kestivät niiden silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden yllättävän hyvin pölkyn keskiosan kuormituskokeet.

Erityisen huomionarvoista on, että Vartiuksen radalta poistetut silmämääräisesti arvioiden kohtalaisesti vaurioituneetkin pölkkyt ylittivät *uusien* ratapölkkyjen murtoa koskevat nykyvaatimukset. Silmämääräisesti havaituilla vaurioilla ei havaittu selkeää yhteyttä murtokuormiin, mutta pölkyn jäykkyyteen ne kuitenkin vaikuttivat hieman. Jäykkyydeltään Vartiuksen pölkkyt olivat heikompia verrattuna esimerkiksi uusiin Bg7- ja BP99-pölkkyihin, mutta yllä todetun mukaisesti tätäkään ei nähdä pölkyn käytettyvyyttä rajoittavana tekijänä.

Laskennallisissa vertailuissa ensimmäisen halkeaman muodostumiseen vaadittava laskennallinen taivutusmomentti vastasi kuormituskokeissa saatuja tuloksia melko hyvin sekä kiskon kohdan että keskiosan staattisissa kuormitustapauksissa. Murtoa vastaava taivutusmomentti oli suurempi staattisissa kokeissa kuin vertailulaskelmissa. Ero korostui ratapölkyn pään kuormituskokeissa, mutta oli havaittavissa myös kaikissa ratapölkkyjen keskiosan kuormituskokeissa.

6.2 Raiteen pituus- ja poikittaissuuntainen vastus

Mellilän ratapihalla toteutetun kuormituskoeohjelman päätavoitteena oli löytää koe-kuormitusten avulla todellisesta rakenteesta mitattuna sekä raiteen pituus- että poikittaissuuntaisen vastuksen arvot.

UIC:n laskentaohjeen UIC 774-3 mukaan 6,5 m pitkän *kuormittamattoman* raiteen laskennallinen *pituussuuntainen* vastus tavanomaisen kunnossapidon raiteessa on

78 kN (12 kN/m) ja korkean kunnossapidon raiteessa 130 kN (20 kN/m). Mellilän rata-pihalla mitattu vastus oli noin 100 kN (noin 15 kN/m), joten vastaavuus laskennalliseen UIC:n ohjeen mukaiseen vastukseen toteutui hyvin. Myös raiteen jäykkyys pituussuuntaisen siirtymisen aikana vastasi hyvin UIC:n ohjeen mukaista jäykkyyttä pienen vaakaliikkeen (< 1 mm) aikana. Ensimmäisessä kuormituksessa pystykuormittamattoman raiteen mitattu jäykkyys oli noin 12800 kN/m/m.

Pystykuormitetun raiteen pituussuuntainen kuormitus osittain epäonnistui kiskonkiinnitysten heikkouden vuoksi. Kiskoon kohdistuva aksiaalinen voima kasvoi niin suureksi, että kisko lopulta liukui ratapölkkyjen suhteen jo noin laskennallisen vaakuorman puolikkaan suuruisella tunkkien voimalla. Kimmoiseksi arvioitu osuus kokeen alussa raiteen pituusmetriä kohden oli suuruusluokaltaan samansuuruinen kuin oli arvioitu UIC 774-3:n pohjalta.

Raiteen voimakkaasta kaareutumisesta johtuen raiteelle ei voitu kokeellisen tutkimuksen pohjalta yksiselitteisesti määrittää *poikittaissuuntaista* alkukimmokerrointa tai vastusta pituusmetriä kohden.

6.3 Ratapölkkyjen tukireaktiot ja rasitustasot raiteessa

6.3.1 Mittausohjelma

Koeohjelmaan sisältyi laaja kenttätutkimusosuus vertailulaskelmineen koskien ratapölkyn radassa junakuorman alla kokemia rasitustasoja. Ratapölkkyjen venymämittaukset tehtiin kahdeksassa eri puolille rataverkkoa sijoittuneessa kohteessa kolmena eri vuodenaikana. Näin voitiin tarkastella ratapölkkyjen kohtaamien rasitustasojen vaihteluvälejä erityyppisissä ratarakenteissa ja eri vuodenaikoina.

Eri puolille rataverkkoa hajautettujen mittauskohteiden lisäksi tarkasteltiin mittauksin betoniratapölkkyjen kohtaamia rasituksia Valtimossa sijaitsevalla koeosuudella, jossa erityyppisiä betoniratapölkkyjä on sijoitettuna sekä sepeli- että soratukikerrososuuksille. Tukikerroksen ominaisuuksien roolia ratapölkkyyn kohdistuvissa rasituksissa tarkasteltiin myös laboratoriossa tukikerrosmateriaalin päällä tehdyin betoniratapölkyn toistokuormituskokein.

Tutkittavilla rataosuuksilla kiinnitettiin keväällä 2011 kolmen peräkkäisen ratapölkyn yläpintaan venymäanturi sekä raiteen keskelle että kiskon viereen raiteen sisäpuolelle. Syksyllä 2011 ja keväällä 2012 junien kuormituksen aikaiset venymät mitattiin lisäksi ulokkeen yläpinnalta. Pohjapainejakautumia varioimalla iteroitiin venymiä vastaavien taivutusmomenttien mukaiset taivutusmomenttijakautumat. Täten venymämittausten avulla voitiin selvittää sekä pohjapainejakautumat eri vuodenaikoina että taivutus- ja leikkausrasitukset.

6.3.2 Mittaustuloksista määritetty pölkkyjen radassa kohtaama taivutusrasitus

Vertailua varten taivutusmomenttilaskelmat tehtiin kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla. Ensin taivutusmomentit laskettiin mitatut venymät aiheuttaneiden tunnettujen akselipainojen ja pölkyn eri kohdista mitattujen venymien suhteiden perusteella iteroituihin pohjapainejakautumiin nojautuen. Myöhemmin tarkastelu perustettiin suoraan mitatuista venymistä laskettuihin taivutusmomentteihin. Näillä kahdella eri laskentatavalla saatiin lähes samat ratapölkkyjen taivutusmomentit.

Mitattujen taivutusmomenttien keskiarvo veturien ja vaunujen pyöräkertojen aiheuttamien kuormitusten aikana oli sekä ratapölkyn keskikohdalla että kiskon kohdalla keskimäärin noin 2,5 kNm. Ratapölkyn yläpinnalla on raiteen keskellä vetojännitys ja kiskon kohdalla puristusjännitys, eli taivutusmomenteilla on eri etumerkki. Mitattujen momenttien keskihajonta oli 1,3–3,2 kNm. Suurimmat mitatut taivutusmomentit sekä keskellä että kiskon kohdalla olivat 10 kNm, joten kaikki mitatut taivutusmomentit olivat pienempiä kuin betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (Ratahallintokeskus 2008) momenttikuvion taivutusmomentit.

6.3.3 Vuodenaikaisvaihtelu pölkyn rasitustasoissa

Tutkituilla rataosuuksilla on tehty myös junakuorman alla tapahtuvien pölkyn palautuvien painumien mittausta osana TERA -tutkimusohjelmaa (Peltokangas et al. 2013). Painuma- ja venymämittaustulosten mukaan vuodenaikojen vaihtelu vaikuttaa radan pystysuuntaiseen jäykkyyteen ja ratapölkkyjen taivutusrasituksiin selvästi. Talvella ratapenkereen jäätyamisen seurauksena raiteen pystysuuntainen jäykkyys on keskimäärin noin kolminkertainen kesäaikaan verrattuna. Mittauskohteiden tulosten keskiarvona ilmaistuna kokonaispystykuorma jakaantuu pölkyn tukireaktiossa siten, että sulassa ratapenkereessä ratapölkyn 1 m pituisen keskiosan tukireaktion osuus on keskimäärin noin 14 % ja jäätyneessä ratapenkereessä noin 8 %. Tämä tukireaktion jakautumisen vaihtelu vaikuttaa selvästi myös ratapölkyn taivutusrasituksiin. Talvella pystykuorma siirtyy pääosin suoraan kiskon kohdan alapuoliselle tukikerrokselle ja kesällä laajemmalle alueelle, jolloin myös taivutusrasitukset ratapölkkyjen keskellä ovat sulan penkereen aikana suuremmat. Kaikkina vuodenaikoina pohjapaineet keskittyivät kiskoja viereen keskimäärin 360 mm pituudelle raiteen keskustan puolelle, jolloin kokonaistukireaktiosta noin 60 % keskittyi tälle alueelle. Ulokkeiden alapuolisen tukireaktion osuus oli noin 30 %.

6.3.4 Tukikerroksen rooli pölkkyjen rasitustasoihin

Sekä laboratoriossa ominaisuuksiltaan erilaisilla tukikerroksilla tehdyissä kuormituskokeissa että Valtimon koekohteella tehdyissä mittauksissa saatiin vahvoja viitteitä siitä, että jopa standardiratkaisun mukainen betoninen ratapölkky kykenee kantamaan liikennekuormituksen väsyminen huomioiden myös soratukikerroksessa.

Laboratoriossa ominaisuuksiltaan erilaisten tukikerrosten päällä tehtyjen syklisten kuormituskokeiden perusteella esitetystä ajatusmallissa tasalaatuisessa pengerrakenteessa ratapölkyn sepeliin kohdistama kuormitus siirtyy enenevässä määrin pölkyn keskelle. Tilanne voi edetä enintään siihen, että ratapölkyn alapinnan tuenta on jakautunut tasaisesti koko pölkyn alalle. Pölkyn päiden pienempi tuenta keskiosaan verrattuna edellyttäisi, että ratapölkyn päissä oleva rakennekerros olisi jäykkyydeltään heikompi. Tällainen jäykkyysero voidaan ajatella toteutuvan ratapenkereen rajallisen leveysulottuvuuden johdosta. Jäykkyyseroa voi aiheuttaa myös tukemiskoneen sekä dynaamisten kuormien aiheuttama sepelin hienontuminen pölkyn päissä.

Alustalukumenetelmällä tarkasteltuna voitiin osoittaa, että kun junan alla tapahtuvat raiteen palautuvat painumat jäävät pieniksi, esimerkiksi talvella ratapenkereen jäätyessä, ratapölkky myös taipuu vähemmän ja samalla taivutusrasitus jää pienemmäksi. Esimerkiksi tasaisen alustaluvun tapauksessa kiskon kohdan painumalla 4,8 mm (kesä) on halkeilemattoman betonisen ratapölkyn taipuma noin 1,5 mm. Vastaavasti 0,9 mm painumalla (talvi) on taipuma vain 0,5 mm. Keskikohdan taivutusrasitus on siis kolminkertainen jälkimmäisessä tapauksessa.

Raidesepelin seulontavaiheessa palautettaessa sepeliä rataa saattaa ratapölkyn päiden alle jäädä rako. Tällöin tuennan sijaitessa vain ratapölkyn keskiosalla saattaa kuormitukseksi tulla täysinäisen raidesepelivaunun paino. Laskennallisen alustalukutarkastelun mukaan on ratapölkyn halkeiluriski tuolla hetkellä suuri, varsinkin, jos kiskon vieressä raidesepeli ei ole yhtä tiivistä kuin raiteen keskellä.

Koska kenttäkokeiden venymämittausten mukainen pohjapaine jakaantui epätasaisesti kiskon kohdan alapuolella, kannattaisi tämä ilmiö huomioida raiteen tukemisen yhteydessä. Jos heti tukemisen jälkeen ulokkeen alapuolinen tukikerros tukisi ratapölkkyä paremmin kuin kiskon viereinen osuus, jäisi tuleva kiskon viereinen pohjapaine pienemmäksi kuin tasaisen tukemisen jälkeen ja samalla ratapölkyn rasitukset jäisivät pienemmiksi. Radan tukikerros kannattaa rakentaa ja tiivistää siten, että tukireaktio raiteelle on suuri kiskoja kohdalla noin metrin leveydellä myös kauan raiteen tukemisen jälkeenkin.

6.3.5 Laskelmin arvioitu pölkkyjen radassa kohtaama taivutusrasitus

Ratapölkky BP99 analysoitiin alustalukumenetelmällä 2D-FEM-ohjelmistolla. Poikkileikkausten jäyhyysmomentit laskettiin halkeilemattomalle betonille ilman punosten vaikutusta, ja betonille käytettiin kimmokerrointa $E = 25000 \text{ MPa}$ eli ns. varovaista arvoa. Alustaluku ratapölkyn tukemiseksi mallinnettiin jousien avulla. Tarkasteluun valittiin 5 eri oletusta alustalukujakaumasta pölkyn alla ja kullakin jakaumalla 3-4 eri alustalukua. Laskentatulosten mukaan jäykällä ratapenkereellä tuenta keskittyy kiskoja kohdille. Tuennan keskittyessä ulokkeen alle syntyy ratapölkkyyn kiskon kohdalle suuri taivutusrasitus. Tuennan keskittyessä kiskon viereen oli keskikohdan taivutusmomentin herkkyyden penkereen jäykkyyden muutoksiin suurinta. Ratapenkereen jäykkyyden pienentyessä keskikohdan taivutusmomentti kasvoi moninkertaiseksi.

Alustalukujakautumia vaihtelemalla oli mahdollista löytää kenttätutkimustuloksia vastaavat taivutusmomentit. Lisätietona saatiin todennäköinen ratapölkyn taipumamuoto junan ollessa tutkittavan ratapölkyn kohdalla. Kuormituksenaikainen laskennallinen raideleveyden muutos ratapölkyn taipuessa oli $-0,3 \dots +1,2 \text{ mm}$.

Myös halkeilun merkitystä tutkittiin alustalukumenetelmällä pienentämällä ratapölkyn taivutusjäykkyyttä kiskon kohdalla ja keskellä neljäsosaan ehjän poikkileikkauksen taivutusjäykkyydestä. Halkeilun vaikutukset ovat tuennan jakautumisen suhteen myönteiset, koska keskikohdalla sekä painuma että tukireaktio pienenevät. Vielä enemmän pieneni keskikohdan taivutusmomentti, joka lähes puolittui. Halkeilun vaikutus korostui jäykällä penkereellä.

Betonisen ratapölkyn BP99 2D-FEM-laskelmien perusteella useilla eri alustalukujakautumilla tarkasteluna pienten painumien tapauksissa ratapölkyn taivutusrasitus on pienempi kuin suurten painumien tapauksissa. Jäykällä radalla tukireaktio keskittyy kiskon alueelle ratapölkyn alapinnalla, jolloin taivutusrasitus on pienempi ratapölkyn keskikohdalla kuin kiskon kohdalla. Siksi nykyisten betonipölkkyjen muotoinen ratapölkky, jossa taivutusjäykkyys on suuri kiskon kohdalla, toimii hyvin.

6.3.6 Vaatimusten ja koekuormitusrasituksen ristiriidat

Vaatimusten, kuormituskoekäyttämisen ja ratapölkyn radalla kohtaamien rasitus-
tasojen vertailemiseksi taulukkoon 6.1 on koostettu

- a) betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa esitettyjen vaatimusten mukaiset taivutuskestävyysvaatimukset ensimmäisen halkeaman synnyn ja murron osalta
- b) staattisissa kuormituskokeissa havaitut ensimmäisen halkeaman syntyä ja murtoa vastaavat taivutusmomentit uusille ratapölkkyille
- c) kentällä mitattuja keskimääräisiä ja suurimpia rasitustasoja vastaavat taivutusmomentit.

Staattisissa koekuormituksissa ratapölkkyille BP99 ja B97 saavutettu ensimmäistä halkeamaa vastaavien taivutusmomenttien keskiarvo kiskon kohdalla vastaa staattisen kokeen vaatimusta (taulukko 6.1). Keskikohdalla koekuormituksissa saavutettiin selvästi vaatimuksia suuremmat arvot. Staattisissa koekuormituksissa ratapölkkyille BP99 ja B97 saavutetut murtoa vastaavien taivutusmomenttien keskiarvot olivat selvästi vaatimuksia suuremmat.

Suomalaisessa suunnitteluohjeistuksessa (RHK 2008) on ristiriita keskikohdan halkeaman muodostumisrajaa vastaavassa taivutusmomenttivaatimuksessa. Valmiiden ratapölkkyjen staattisessa kuormituskokeessa on sama vaatimus, $M=12\text{ kNm}$, ensimmäistä halkeamaa vastaavana taivutuksena kuin momenttikuviossa 3 MPa vetoa vastaavana taivutuksena, vrt. julkaisun osan 1 luvun 4 yhteenveto (Rantala et al 2013).

Ratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa (RHK 2008) vaaditaan staattisessa kuormituskokeessa kiskon kohdalla murtotilanteessa 45 kNm (teräslevy huomioiden noin 40 kNm) taivutusmomenttikestävyys. Tämä on selvästi suurempi vaatimus kuin suunnitteluvaiheen taivutusmomenttikestävyys 34 kNm.

Käyttörajatilassa ruotsalaiset suunnitteluvaiheen taivutusmomenttivaatimukset ovat samaa suuruusluokkaa suomalaisten vaatimusten kanssa. UIC:n ohjeistus poikkeaa pohjoismaisesta selvästi lähinnä pölkyn keskellä tapauksessa, jossa tasainen pohjapaine vaikuttaa koko pölkyn matkalla tai kiskon kohdalla 1 m matkalla. (Rantala et al. 2013)

Taulukko 6.1 Ohjeellinen tai mitattu taivutusmomentin arvo, kNm.

Ohje (Rantala et al. 2013) tai mittaustulos	kiskon kohta	keskikohta
Suomi, RHK 2008, momenttikuvio, <u>vetojäännitysmax = 3 MPa</u> ja puristusjäännitysmax = 20 MPa	17	-12
Suomi, RHK 2008, momenttikuvio, <u>murto</u>	34	-24
Suomi, RHK 2008, staattinen kuormituskoe, <u>ensimmäinen halkeama</u>	23 ⁽¹⁾	-12 ⁽²⁾
Suomi, RHK 2008, staattinen kuormituskoe, <u>murto</u>	45 ⁽¹⁾	-24 ⁽²⁾
Staattisissa koekuormituksissa saavutettu <u>ensimmäistä halkeamaa vastaavien</u> taivutusmomenttien keskiarvo, Bg7, teräksisen välilevyn leveys huomioitu	21	-18
Staattisissa koekuormituksissa saavutettu <u>ensimmäistä halkeamaa vastaavien</u> taivutusmomenttien keskiarvo, BP99, teräksisen välilevyn leveys huomioitu	22	-18
Staattisissa koekuormituksissa saavutettu <u>murtoa vastaavien</u> taivutusmomenttien keskiarvo, Bg7, teräksisen välilevyn leveys huomioitu	65	-40
Staattisissa koekuormituksissa saavutettu <u>murtoa vastaavien</u> taivutusmomenttien keskiarvo, BP99, teräksisen välilevyn leveys huomioitu	59	-38
Kenttäkokeissa eri <u>rataosuuksilla mitattujen</u> taivutusmomenttien <u>keskiarvo</u> , mittaustulosten lukumäärä: kiskon kohdalla n = 68 ja keskellä n = 189	2,6	-2,5
Kenttäkokeissa eri <u>rataosuuksilla mitattujen</u> taivutusmomenttien <u>maksimiarvo</u>	10	-10

⁽¹⁾ Pistekuormaa ratapölkyn suuntaisesti jakavan teräslevyn vaikutusta ei ole huomioitu. Karkeasti arvioituna teräslevy pienentäisi taivutusmomenttia 10 %.

⁽²⁾ Pistekuormaa ratapölkyn suuntaisesti jakavat teräslevyt kiertyvät ratapölkyn taipuman mukaan, jolloin levyjen vaikutus ratapölkyn rasitukseen on hyvin vähäinen.

6.3.7 Vaatimusten ja koekuormitusrasituksen vertailu kentällä havaittuun taivutusrasitukseen

Kenttäkokeiden keskimääräinen taivutusmomentti raiteessa kiskon kohdalla oli 2,6 kNm ja keskihajonta 1,9 kNm taulukon 6.2 mukaisesti. Uusien ratapölkkyjen laskennallinen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti on 24 kNm. Väsytyskuormituskoe tulosten nojalla kohdassa 2.5.3 esitetyn väsymismallin perusteella ratapölkky kestää 26 kNm toistuvaa taivutusrasitusta noin 25 miljoonaa kertaa. Varsin vilkasliikenteistä rataosaa vastaavalla oletuksella 0,5 miljoonasta vuotuisesta akselinylityksestä tämä vastaisi 50 vuoden käyttöikää.

Taulukko 6.2 Betonisen ratapölkyn pään väsyminen, kiskon kohta

25x10 ⁶ syklin taivutusmomentti-kestävyys [kNm]	Uusien pölkkyjen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien keskiarvo [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien hajonta [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien maksimi [kNm]	Momenttikuvio RHK 2008 [kNm]
26	24	2,6	1,9	9,9	17

Kenttäkokeiden keskimääräinen taivutusmomentti raiteen keskellä oli 2,5 kNm ja keskihajonta 2,3 kNm (taulukko 6.3). Uusien ratapölkkyjen laskennallinen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti on 15 kNm. Väsytyskuormituskoetulosten perusteella on kohdassa 2.6.3 esitetty arvio väsytyskuormitetun ratapölkyn keskiosan taivutuskestävyydelle.

Taulukko 6.3 Betonisen ratapölkyn keskikohdan väsyminen

25x10 ⁶ syklin taivutusmomentti-kestävyys [kNm]	Uusien pölkkyjen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien keskiarvo [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien hajonta [kNm]	Kenttäkokeet, taivutusmomenttien maksimi [kNm]	Momenttikuvio RHK 2008 [kNm]
13	15	2,5	2,3	10,1	12

Kenttäkokeiden mittaustulosten mukaan ratapölkkyjen rasitustaso on pieni suunnitteluvaatimukseen verrattuna. Esimerkiksi lovipyörien aiheuttamista iskuista syntyneet halkeamat eivät aukea keskimääräisillä mitatuilla taivutusrasituksilla, joten halkeamien vaikutus jää vähäiseksi (vrt. kohta 6.1).

Kuormituskokeista johdettu väsymisraja ja laskennallinen halkeilurajatilaa ovat selvästi suurempia kuin kenttäkokeissa mitatut taivutusmomentit. Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen murtuminen liikennekuormituksessa väsymisen vaikutukset huomioon ottaen on siis hyvin epätodennäköistä.

6.3.8 Ratapölkkyjen tukireaktiotapaukset uusien pölkkyjen suunnittelua varten

Betoniset ratapölkkyt on useiden vuosikymmenten ajan mitoitettu tilaajan esittämän momenttikuvion taivutusmomenttien mukaan. Taivutusmomentti riippuu pölkyn tukireaktiosta ja pölkkyyn kohdistuvasta kuormasta. Niiden osalta tämän hetkisen momenttikuvion taustalla olevista oletuksista ei ole selvyyttä. Tässä työssä haluttiin kehittää tavanomaista rakennesuunnittelua vastaava mitoitusmenetelmä, jossa huomioidaan tutkimuksen yhteydessä saavutettu käsitys ratapölkyn mahdollisista tukireaktioista ja pohjapainejakautumista.

Ensin laskettiin 2D-FEM-ohjelmistolla 18 erilaisella alustalukujakautumalla ratapölkyn muodonmuutokset, painumat ja rasitukset. Valitut alustalukujakautumat perustuivat kenttäkokeissa mitattuihin pohjapainejakautumiin ja painumiin. Laskemien tuloksina saadut taivutusmomentit ja taipumat (kohta 4.2.2) olivat yhteneviä kenttäkokeiden mittaustulosten ja aiempien laskelmien suhteen, joten uusien ratapölkkyjen suunnittelua varten laadittiin näihin laskelmiin perustuva mitoitusohjeistus. Uudet ratapölkkyt esitetään mitoitettavaksi kahdeksan erilaisen alustalukujakautuman ja

normaalin rakennesuunnittelukäytännön mukaan. Mitoitusmenetelmän tuloksia verrattiin nykyisin valmistettaviin ratapölkkyihin likimääräistarkasteluilla. Laskenta-esimerkit osoittavat, että nykyiset pölkkytyypit BP99 ja Bg7 kestävät myös esitetyn uuden mitoitusmenetelmän mukaiset rasitukset.

Uusien ratapölkkyjen suunnittelussa käytettävän pyöräkuorman määrittäminen on tilaajan tehtävä. Määrittelyssä pitää huomioida akselipainon lisäksi kuorman jakautuminen kiskoille ja peräkkäisille ratapölkkyille sekä dynaaminen kerroin. Mitoituspyöräkuorman määrittelyä suositellaan tarkasteltavaksi jatkotutkimuksissa. Tässä yhteydessä esimerkkilaskelmissa ja suunnitteluohje-ehdotuksessa päädyttiin käyttämään kuormaa, joka saatiin akselipainosta 250 kN sysäyskerroin 1,6 huomioiden seuraavasti: $1,6 \cdot 250 \text{ kN} / (2 \cdot 2) = 100 \text{ kN}$. Oletuksena oli täten 200 kN pyöräkuorma, josta 50 % kohdistui tarkasteltavalle ratapölkylle.

Alustalukutarkastelulla tuentatapauksella, jossa raiteen keskellä oli 64 % kiskon kohdan alustaluvusta, kuorma oli 100 kN ja palautuva painuma oli suuri (noin 5 mm), saatiin kiskon kohdan taivutusmomentiksi 11,3 kNm ja ratapölkyn keskellä taivutusmomentiksi 8,1 kNm. Jos rakenteen käyttäytyminen olisi lineaarista, vastaisi 1,47-kertainen kuorma RHK:n (2008) momenttikuvion mukaista tilannetta mainituissa kohdissa edellä esitetyillä oletuksilla. Tällöin tässä esimerkkitapauksessa nykyistä momenttikuviota vastaavaksi akselipainoksi saataisiin $147 \text{ kN} \cdot (2 \cdot 2) / 1,6 = 368 \text{ kN}$. Toisena esimerkkitapauksena esitetään tässä tuentatapaus, jossa kiskon vieressä on suuri alustaluku 350 mm matkalla. Tällöin suuren painuman tapauksessa saataisiin 100 kN kuormalla lähes mitoitusmomentin mukainen 12 kNm taivutusmomentti ratapölkyn keskelle, eli kuormitus- ja tuentatapauksista vastaavaksi akselipainoksi noin 250 kN.

6.4 Betonin rapautuminen

Kirjallisuustutkimuksen perusteella merkittävä ratapölkkyjen käyttöikään vaikuttava tekijä on rapautuminen ja sen tehokkaaseen ehkäisemiseen pystytään vaikuttamaan valmistuksen aikana. Rapautuminen voi johtua pakkasrasituksesta, ettringiitistä, alkali-kiviainesreaktiosta tai niiden yhteisvaikutuksesta. Rapautuminen aikaansaa betoniin säröilyä, joka heikentää betonin pitkäaikaiskestävyyttä ja alentaa betonin lujuutta. Lujuuden aleneminen saattaa johtaa liikennekuormituksen aikaansaamiin halkeamiin.

Suomessa merkittävin rapautumisen muoto on pakkasrapautuminen. Osassa 1960- ja 1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkkyissä rapautuminen on ollut ongelma. Syynä on pakkasrapautumisen ja ettringiitin yhteisvaikutus, mikä on aikaansaanut voimakastakin rapautumista. Ongelmien johdosta ratapölkkyjen rapautumiskestävyyksvaatimuksia on kiristetty ja lämpökäsittely kielletty. Nykyään valmistettavissa pölkkyissä ei ole juurikaan havaittu rapautumisen aiheuttamia vaurioita.

Laajassa rapautumista käsittelevässä kokeellisessa osuudessa pyrittiin selvittämään Suomessa käytettävien betoniratapölkkyjen rapautumisalttiutta ja rapautuneisuutta. Vuonna 2010 tehdyissä pakkassuolakokeissa suolana käytettiin merisuolaa, joka aiheutti erittäin voimakkaan rapautumisreaktion uusilla sekä osalla 70-luvulla valmistetuista pölkkyistä. Ainoastaan BV75-tyyppiset pölkkyt kestivät merisuolan hyvin ja seitsemästä näytesarjassa vain yhden tilavuus muuttui yli neljä prosenttia. Väärän suolan pakkassuolakokeissa aikaansaama rapautuminen ei kuitenkaan kuvasta todellista pakkasenkestokykyä, varsinkin kun merisuolan kaltaisia suoloja ei käytännössä esiin-

ny rataverkolla. Merisuola vaihdettiin natriumkloridiin ja pakkassuolakoe uusittiin viidelle näytesarjalle, joista kaksi oli käyttämättömistä pölkyistä ja kolme 70-luvulla valmistetuista pölkyistä. Uusintakokeissa ei havaittu voimakasta pakkasrapautumista. Ainoastaan silmämääräisesti arvioiden huonokuntoisen B63-pölkyn näytesarjan tilavuus muuttui yli sallitun 4 %.

Vuonna 2012 rapautumistutkimuksia tehtiin käyttämättömille sekä radassa olleille pölkyille. Tutkittavana oli Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkkyjä eri puolilta suomea sekä vuonna 1975 valmistettuja Vartiuksen radasta poistettuja pölkkyjä. Tehyjen punnituskokeiden ja ohuthietarkastelujen perusteella betoniratapölkkyissä oleva suojahuokosten määrä oli vähäinen, joskin betoni oli myös tavanomaista tiiviimpää. Vähäinen suojahuokosten määrä kuitenkin heikentää pölkkyjen pitkäaikaiskestävyyttä kosteissa olosuhteissa. Myös jäädytys-sulatuskokeissa saatujen tulosten perusteella kaikista pölkyistä otettuja näytteitä ei voida luokitella pakkasta kestäväksi. Jäädytys-sulatuskokeissa keskimäärin parhaiten pärjäsivät Lujan valmistamista pölkyistä otetut näytteet. Keskimäärin heikoiten pärjäsivät Vartiuksen radasta poistetut 70-luvulla valmistetut pölkkyt. Vartiuksen pölkkyt ovat olleet radassa noin 15-20 vuotta pidempään verrattuna Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkkyihin. Vartiuksen radassa olleet pölkkyt ovat näin ollen altistuneet pidempään mekaaniselle rasitukselle ja pakkasrasitukselle. Tämä todennäköisesti vaikuttaa kokeista saataviin tuloksiin, joskin toisaalta myös osaaminen rapautumiskestävyyden huomioimiseksi betonipölkyn valmistuksessa kehittyi tuon 15-20 vuoden aikana.

Vartiuksen radan betoninäytteiden ultraäänitutkimus antoi viitteitä pakkasrapautumisen ja mekaanisen rasituksen aikaansaamista vaurioista. Osassa Vartiuksen radasta poistetuista pölkyistä oli havaittavissa äänen nopeuden alenemista betonissa. Äänen nopeuden alenemisellä havaittiin selvä yhteys muihin testimenetelmiin. Myös ohuthienäytteissä oli havaittavissa pakkasrapautumisen merkkejä. Pakkassuolakokeita tehtiin kahdeksalle Vartiuksen radasta poistetuista pölkyistä otetulle näytesarjalle. Näytesarjoista neljän tilavuudenmuutos ylitti vaatimuksen mukaisen 4 % enimmäismäärän.

Lujan ja Parman alkupään tuotannon pölkkyt pärjäsivät pääsääntöisesti erittäin hyvin pakkassuolakokeissa. Testattavana oli kuitenkin kolme Parman pölkyistä otettua näytesarjaa, jotka eivät täyttäneet betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen uusille pölkyille asettamaa tilavuudenmuutosvaatimusta. Näytteiden rapautuminen oli erittäin voimakasta vasta aivan kokeen loppupuolella. Voimakas rapautuminen kokeen loppupuolella voi viitata pakkasrapautumisesta poikkeavaan rapautumismekanismiin, varsinkin kun samoista pölkyistä otetuissa ohuthienäytteissä ei ollut merkkejä pakkasrapautumisesta.

Lähes kaikissa käytössä olleista ratapölkkyistä otetuissa ohuthienäytteissä oli merkkejä ettringiitin kaltaisista täyte kiteytymistä. Täyte kiteytymät olivat pääsääntöisesti ohuita ja viittaavat lähinnä suureen kosteusrasitukseen sekä kosteuden etenemiseen betonissa. Osassa Vartiuksen radasta poistetussa pölkkyssä oli myös viitteitä alkali-silikareaktiosta.

Osaa rapautumistutkimuksissa olleista näytesarjoista ei kokeiden perusteella voitu luokitella pakkasenkestäväksi. Kuitenkin Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkyissä ei ollut merkkejä pakkasrapautumisen aikaansaamista halkeamista vaikka pölkyt olivat olleet radassa 15-20 vuotta ja 70-luvulla rataa asennetuista pölkyistä vain osasta löytyi merkkejä pakkasrapautumisesta. Näin ollen voidaan arvioida, että Suomen rataverkolla olevat pölkyt vastustavat rapautumista rasisolosuhteet huomioon ottaen vähintäänkin tyydyttävästi.

7 Päätelmät ja jatkotutkimustarpeet

Uusien pölkkyjen kuormituskestävyys

Uusien ratapölkkyjen (BP99, B97) kuormituskestävyys staattisissa kuormituskokeissa oli hyvä. Kestävyysvaatimukseen (RHK 2008) verrattuna ratapölkkyt kestivät kuormaa vaatimuksia enemmän sekä pään että keskikohdan kuormituskokeissa. Ensimmäinen halkeama kuormituskokeissa syntyi vasta selvästi taivutusmomenttikuvion vetojännitystä 3 MPa vastaavaa taivutusmomenttia suuremmalla momentilla.

Vanhojen pölkkyjen kuormituskestävyys

Kuormituskokeiden perusteella radassa olevat BV75-pölkkyt ovat vähintään yhtä kestäviä kuin nykyään Suomen rataverkolle hankittavat B97- ja BP99-pölkkyt. Myös B63- ja B75-ratapölkkyt kestivät niiden silmämääräisesti arvioitu kunto huomioden yllättävän hyvin kuormituskokeet. Vartiuksen radalta poistetut silmämääräisesti arvioiden kohtalaisesti vaurioituneet pölkkyt ylittivät *uusien* ratapölkkyjen murtoa koskevat nykyvaatimukset. Silmämääräisesti havaituilla vaurioilla ei havaittu selkeää yhteyttä murtokuormiin, mutta pölkyn jäykkyyteen ne kuitenkin vaikuttivat hieman. Jäykkyydeltään Vartiuksen pölkkyt olivat heikompia verrattuna esimerkiksi uusiin B97- ja BP99-pölkkyihin, mutta tätäkään ei nähdä pölkyn käytettävyyttä rajoittavana tekijänä.

Halkeaman synty ja merkitys

Liikennekuormien hetkelliset maksimiarvot ovat junien loviipyörien vuoksi joskus selvästi ratapölkkyjen suunnitteluohjeistuksessa määritettyjä kuormia suurempia. Loviipyöristä johtuvat iskut aiheuttavat halkeilua erityisesti kiskojen kohdille ratapölkyn alapintaan. Toisaalta liikennekuormituksen seurauksena vähitellen myös raiteen keskelle kohdistuva ratapölkyn tukireaktio voi johtaa halkeaman syntyyn ratapölkyn keskelle yläpintaan. Halkeamat eivät jää avonaisiksi liikennekuorman poistumisen jälkeen, koska ratapölkyn jännevoima puristaa halkeaman kohdan kiinni. Tällöin punosten korroosioriski pienenee merkittävästi. Laboratoriokuormituskokeissa havaittiin, että raiteessa ratapölkkyihin syntyneiden halkeamien vaikutus pölkkyjen kuormituskäyttäytymiseen oli käytännössä hyvin vähäinen.

Ratapölkyn tukireaktiot ja rasitustila radassa

Kenttäkokeiden venymämittaustulosten laskennallisen tarkastelun perusteella määritettiin todellisen liikennekuormituksen aiheuttamat pohjapainejakautumat ratapölkyn alapinnalla. Tyypillinen jakautuma poikkesi kirjallisuudessa, esimerkiksi UIC:n suunnitteluohjeistuksessa, esitetyistä pohjapainejakautumista. Kenttämittausten mukaan pohjapaine yleensä keskittyi kiskon viereen noin 350 mm matkalle kiskon sisäpuolelle. Alustalukutarkastelujen mukaan tällainen pohjapainejakautuma melko jäykässä tukikerroksessa johtaa itseisarvoiltaan yhtä suuriin taivutusmomentteihin ratapölkkyssä kiskon kohdalla ja raiteen keskellä. Tyypillisillä radan liikennekuormilla taivutusrasitukset jäävät tällöin selvästi suomalaisia käyttörajatilan taivutusmomenttivaatimuksia pienemmiksi. Eri rataosuuksilla ja eri vuodenaikoina pohjapainejakautumat poikkesivat selvästi toisistaan. Myös peräkkäisten ratapölkkyjen jakautumat saattoivat olla keskenään erilaiset. Sepelinpuhdistuksen yhteydessä on syytä korostetusti varoa ratapölkyn suuria taipumia mahdollistavan tuennan muodostumista. Betoniratapölkyn kuormituskestävyys myös soratukikerroksella vaikuttaa varsin hyvältä, ja

betoniratapölkyn soveltuvuutta puuratapölkyn korvaajaksi suositellaan jatkotutkimuksissa tarkasteltavaksi myös muista näkökulmista.

Työssä kehitettiin ehdotus alustalukutarkasteluun perustuvasta ratapölkyn mitoitusmenetelmästä, jossa huomioidaan tutkimuksen yhteydessä saavutettu käsitys ratapölkyn mahdollisista pohjapainejakautumista. Mitoituksessa käytettävän pyöräkuorman määrittelyä suositellaan tarkasteltavaksi jatkotutkimuksissa.

Väsyminen

Radassa mitatut ratapölkkyjen rasitukset ovat pieniä verrattuina väsytyksokeissa ratapölkkyihin syntyneisiin rasituksiin. Väsytyksokeiden tuloksista luodun väsymismallin perusteella voitiin arvioida, että uusi ratapölkky kestää murtumatta suurusluokaltaan 50 vuoden toistokuormitusta vastaavat 25 miljoonaa kuormituskertaa taivutusmomenttia, joka on ratapölkyn kiskon kohdalla noin kymmenkertainen ja keskellä noin viisikertainen radalla mitattuihin taivutusmomenttien keskiarvoihin verrattuina. Kenttäkokeissa mitatut taivutusmomenttien huippuarvotkin jäivät määritettyjä väsymisen raja-arvoja pienemmiksi.

Rapautumisen tärkeys vaurioitumismekanismeissa

Rapautuminen on olennainen tekijä ajateltaessa pölkyn pitkäaikaiskestävyyttä. Osassa 1960- ja 1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkkyissä rapautuminen on ollut ongelma ja se on aiheuttanut pölkyn käyttöiän merkittävää lyhenemistä. Syynä rapautumisongelmiin oli betonin lämpökäsittely, joka johti haitalliseen ettringiittireaktioon. Ongelman ilmettyä varsinainen lämpökäsittely on kielletty ja betonin rapautumista koskevia kriteerejä on tiukennettu. Myös pakkasrapautumista on havaittu. Nykyään valmistettavissa ratapölkkyissä ei ole juurikaan havaittu rapautumisen aiheuttamia vaurioita, mutta rapautumiskestävyyden jatkuva tarkkailu on ratapölkyn käyttöiän varmistamisessa ensiarvoisen tärkeää.

Loppupäätelmä

Betoniratapölkkyjen kuormituskestävyys on radan rasitustilanne huomioiden hyvä. Betoniratapölkkyjen käyttöikää voidaan yleisessä tapauksessa jatkaa selvästikin nykyisiä käyttöikäsuosituksia pidemmäksi. Tämä edellyttää, että valmistusongelmien aiheuttamaa tavanomaista voimakkaampaa rapautumista ei tapahdu. Rapautumiskestävyydestä huolehtiminen on uusien ratapölkkyjen tuotannossa pitkän käyttöiän varmistamiseksi ensiarvoisen tärkeää. Uudet ja useimmat vanhatkin ratapölkkytyypit kestäisivät myös väsymisvaikutus huomioiden nykyistä suurempia akselipainoja, varsinkin kun raiteen asianmukaisesta tuentatilanteesta huolehditaan.

Kirjallisuusluettelo

Abetong. 1989. Parman betoniratapölkkyjen laskelmat. 24.8.1989

EN 1991-2. 2004. Eurocode 1. Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges. CEN - European committee for standardization. Brussels.

Esveld C. 2001. Modern Railway Track – Second Edition, MRT-productions, 654 p.

Fagerlund G. 1994. Influence of environmental factors on the frost resistance of concrete. A contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92-0591 "The residual service life of concrete structures". Lund, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. Report TVBM-3059. 48 p. In: Vesikari E. 1998. Prediction of Service Life of Concrete Structures by Computer Simulation. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering. Licentiate thesis. 131 p.

Grantham M. (editor) 2011. Concrete repair – A practical guide. New York, Taylor & Francis. 302 s.

Grantham M. 2003. 6 – Diagnosis, inspection, testing and repair of reinforced concrete structures In: Newman J. (editor). Advanced Concrete Technology Set, Vol. 2. Oxford, Butterworth Heinemann. Ss. 6/1–6/54

Grundfelt P. 1980. Betoniratapölkkyjen rapautuminen. Rautatieopillinen kurssi.

Gustavson R. 2002. Structural behaviour of concrete railway sleepers, Doctoral Dissertation, Chalmers Concrete Structures, Gothenburg. Chalmers University of Technology, Sweden. November 2002, 157 pp

Kerokoski O. 2007. Raiteen pituus- ja poikittaissuuntaisen vastuksen määrittäminen. Koekellinen tutkimus, Mellilän ratapiha. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden laitos. 86 s. + 13 liites. (julkaisematon)

Kewalramani M., Gupta R. 2006. Concrete Compressive Strength Prediction Using Ultrasonic Pulse Velocity Through Artificial Neural Networks. Automation in Construction 15 (2006). Ss. 374–379.

Kolisoja P., Järvenpää I. ja Mäkelä E. 2000. Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 10/2000. ISBN 952-445-042-9.

Lahdensivu J. 2012. Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University of Technology, Publication 1028, Tampere. 117 s.

Luomala H.. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010.

Novotechnik. 2010. Position Transducers with Restoring Spring. 10, 25, 50, 75, 100 mm. TR, TRS Series (mittalaitteet). Inc. 155 Northboro Road, Southborough, MA 01772, USA. [Viitattu 20.4.2010]. Saatavissa: <http://www.novotechnik.com/catalogs/pdfs/TRTRS.pdf>.

Nurmikolu A. 2007. Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaus erilaisilla tukikerroksilla. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet. 47 s.+ 12 .

Qasrawi H. 2000. Concrete Strength by Combined Nondestructive Methods Simply and Reliably Predicted. Cement and Concrete Research 30 (2000). Ss. 739–746.

Peltokangas O. 2012. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma.

Peltokangas O., Luomala H., Nurmikolu A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. *Tulossa julkaisuna: Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä* (x/20113). 163 s. +13 liites.

Popovics S., Popovics J. 1991. Effect of Stresses on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete. Materials and Structures 24 (1991). Ss. 15–23.

Rakentajain kalenteri 1998. Rakennustieto Oy. ISSN 0355-550 X.

RakMK B4. 2005. Betonirakenteet. Ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö.

Rantala T. 2010. Betoniratapölkyn vauriomekanismi. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 88 sivua, 36 liitesivua.

Rantala T., Kerokoski O. ja Nurmikolu A. 2013. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Kirjallisuusselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarja.

Ratahallintokeskus 2002. Ratatekniset ohjeet radan päällysrakenne (RATO 11). Ratahallintokeskus. 87 s.

Ratahallintokeskus 2008. Esijännitetyt betoniratapölkkyt: Betoniratapölkkyjen tekniset toimitusehdot. Ratahallintokeskus. 1942/042/2008.

SFS 5449. 1988. Betoni. Säilyvyys. Pakkas-suolakestävyys.

SFS-EN 13230. 2009. Railway applications. Track concrete sleepers and bearers. Part 1-2. European committee for standardization.

SFS-EN 583-3. 1997. Rikkomaton aineenkoetus, Ultraäänitarkastus, osa3: Läpäisytekniikka. Suomen Standardisointiliitto SFS

Suomen Betoniyhdistys . 1980. BY15 Betoninormit 1980. Suomen Betoniyhdistys, Helsinki. 130 s.

Tulonen J. et al. 2013 . Rautatiesiltojen vaurioituminen. *Tulossa julkaisuna: Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä* (x/20113).

UIC CODE 713. 2004. Design of monoblock concrete sleepers. 1st edition, November 2004.

UIC Code 774-3 R. 2001. Track/bridge Interaction. Recommendations for calculations. 2nd edition. International Union of Railways.

Esimerkkejä ratapölkkyjen rakenteellisesta mitoitukselta eri alustalukujakautumilla

Tällä hetkellä Suomen rataverkolle hankittavalle ratapölkylle tehdään likimääräinen tarkistuslaskenta sekä kiskon kohdalla että keskikohdalla. Laskennassa arvioidaan sekä betonin vetojännityksen suuruus että poikkileikkauksen taivutuskestävyys. Vetojännitysverailu tehdään tässä vetolujuuden f_{ctk} , ei taivutusvetolujuuden $f_{ctk,fl}$, suhteen. Taivutusvetolujuus olisi ratapölkyn korkuisella rakenteella noin 1,4-kertainen.

Esimerkkien tuentatapaukset on valittu siten, että kiskon kohdalla (tarkastelut a ja b) tai ratapölkyn keskelle (tarkastelut c ja d) syntyy suuri taivutusrasitus.

Tarkastelu a) Vetojännitys kiskon kohdalla

Tuentatapaus, jossa kolminkertainen alustaluku ulokkeen alla => $M_{Ek, kiskon\ kohta} = 15\text{ kNm}$ (ominaisarvo) = $100\text{ kN} \cdot 0,15\text{ m}$

Halkeamattoman poikkileikkauksen taivutusvastus alareunan suhteen: $W_{alareuna} = 0,00198\text{ m}^3$ (ks. taulukko 2.7)

Kuorman aiheuttama vetojännitys $\sigma_{Et} = M/W = 0,015\text{ MNm}/0,00198\text{ m}^3 = 7,6\text{ MN/m}^2$ (MPa)

Punosvoiman vaikutus alareunan vetojännitykseen: keskeinen puristus 5,44 MPa. Punosvoiman momentin vaikutus: alareunassa puristusta 1,16 MPa. Punosvoimasta yhteensä 6,6 MPa puristusta poikkileikkauksen alareunassa, vrt. taulukko 2.8.

Vetojännitys yhteensä $\sigma_{t,yht} = 7,6\text{ MPa} - 6,6\text{ MPa} = 1\text{ MPa} < f_{ctk} = 2,9\text{ MPa} \Rightarrow \text{OK}$

Tarkastelu b) Taivutuskestävyys kiskon kohdalla

Tuentatapaus, jossa kolminkertainen alustaluku ulokkeen alla => $M_{Ed, kiskon\ kohta} = 2 \cdot 15\text{ kNm} = 30\text{ kNm}$ (mitoitussarvo)

Betoni C50/60, $f_{ck} = 50\text{ MPa}$, $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 28,3\text{ MPa}$

Jännepunos $f_{p0,2} = 1630\text{ MPa}$, $f_{pd} = f_{p0,2} / \gamma_p = 1417\text{ MPa}$

Punossijainnit yläreunasta mitaten $d_{yläpun} = 97\text{ mm}$, $d_{alapun} = 185\text{ mm}$

Vetovoima yläpunoksissa $P_{d,yläp} = A_{p,yläp} \cdot f_{pd} = 170 \cdot 1417 = 241\text{ kN}$

Vetovoima alapunoksissa $P_{d,alap} = A_{p,alap} \cdot f_{pd} = 85 \cdot 1417 = 120\text{ kN}$

Arvioidaan poikkileikkauksen puristuspinnan leveys $b \approx 195\text{ mm}$ ja puristuspinnan korkeus $y \approx 65\text{ mm}$

Puristusvoima $N_c = b \cdot y \cdot f_{cd} = 359\text{ kN} \approx P_{d,yläp} + P_{d,alap} \Rightarrow \text{OK}$

Punosten sijainnit puristuspinnan keskeltä mitaten $z_{yläp} = 65\text{ mm}$ $z_{alap} = 152\text{ mm}$

Taivutuskestävyys $M_{Rd} = P_{d,yläp} \cdot z_{yläp} + P_{d,alap} \cdot z_{alap} = 15,7 + 18,2 = 33,9 \text{ kNm} > M_{Ed} \Rightarrow \text{OK}$

Tarkastelu c) Vetojännitys ratapölkyn keskellä yläpinnalla

Tuentatapaus, jossa kiskon vieressä 5- ja 8-kertainen alustaluku $\Rightarrow M_{Ek,keskikohta} = 11,6 \text{ kNm}$ (ominaisarvo, vrt. kohta 4.2.2.5) $= 100 \text{ kN} \cdot 0,116 \text{ m}$

Halkeamattoman poikkileikkauksen taivutusvastus yläreunan suhteen: $W_{yläreuna} = 0,001006 \text{ m}^3$ (ks. taulukko 2.8)

Kuorman aiheuttama vetojännitys yläreunalla $\sigma_{Et} = M/W = 0,0116 \text{ MNm} / 0,001006 \text{ m}^3 = 11,5 \text{ MN/m}^2 \text{ (MPa)}$

Punosvoiman vaikutus yläreunan vetojännitykseen: keskeinen puristus 7,7 MPa. Punosvoiman momentin vaikutus: yläreunassa puristusta 2,1 MPa. Punosvoimasta yhteensä 9,8 MPa puristusta poikkileikkauksen yläreunassa, vrt. taulukko 2.8.

Vetojännitys yhteensä $\sigma_{t,yht} = 11,5 \text{ MPa} - 9,8 \text{ MPa} = 1,7 \text{ MPa} < f_{ctk} = 2,9 \text{ MPa} \Rightarrow \text{OK}$

Tarkastelu d) Taivutuskestävyys ratapölkyn keskellä yläpinnalla

Tuentatapaus, jossa kiskon vieressä 5- ja 8-kertainen alustaluku $\Rightarrow M_{Ed,keskikohta} = 2 \cdot 11,6 \text{ kNm} = 23,2 \text{ kNm}$ (mitoitussarvo, puristus alapinnalla)

Betonin ja teräksen mitoituslujuudet $f_{cd} = 28,3 \text{ MPa}$ $f_{pd} = 1417 \text{ MPa}$

Alapunokset sijaitsevat niin lähellä puristuspinnan keskikohtaa, että ne jätetään huomioimatta taivutuskestävyytlaskennassa. Yläpunosten sijainti alareunasta mitaten $d_{yläpun} = 123 \text{ mm}$.

Vetovoima punoksissa $P_{d,yläp} = 241 \text{ kN}$ (8 kpl) $P_{d,alap} = 120 \text{ kN}$ (4 kpl)

Arvioidaan poikkileikkauksen puristuspinnan leveys $b \approx 225 \text{ mm}$ ja puristuspinnan korkeus $y \approx 44 \text{ mm}$

Puristusvoima $N_c = b \cdot y \cdot f_{cd} = 280 \text{ kN} \approx P_{d,yläp} + 33\% \cdot P_{d,alap} \Rightarrow \text{OK}$

Yläpunosten sijainti puristuspinnan keskeltä mitaten $z_{yläp} = 101 \text{ mm}$

Taivutuskestävyys $M_{Rd} = P_{d,yläp} \cdot z_{yläp} = 24,3 \text{ kNm} > M_{Ed} \Rightarrow \text{OK}$

Oletetun alustalukujakauman ja betonin vetolujuuden mukainen akselipaino

Luvun 4 alustalukutarkastelun tuloksia voidaan hyödyntää myös raiteelle sallittavan suurimman akselipainon arvioimiseen. Ratapölkylle BP99 tehtiin likimääräinen vetojännityslaskenta sekä kiskon kohdalla että keskikohdalla. Tuloksista pienempi on määräävä laskentatuloks.

Vetojännitysvertailu tehdään tässä vetolujuuden f_{ctk} , ei taivutusvetolujuuden $f_{ctk,fl}$, suhteen. Taivutusvetolujuus olisi ratapölkyn korkuisella rakenteella eurokoodin EN 1992-1-1 mukaan noin 1,4-kertainen. Tarkastelun perustana on betonin vetolujuutta vastaavan laskennallisen vetojännityksen etsiminen valituilla luvun 4 alustalukujakaumilla. Esimerkkien tuentatapaukset on valittu siten, että kiskon kohdalle (tarkastelu a) tai ratapölkyn keskelle (tarkastelu b) syntyy suuri taivutusrasitus.

Tarkastelu a) Vetojännitys kiskon kohdalla

Halkeamattoman poikkileikkauksen taivutusvastus alareunan suhteen: $W_{alareuna} = 0,00198 \text{ m}^3$ (taulukko 2.7)

Punosvoiman vaikutus alareunan vetojännitykseen: keskeinen puristus 5,44 MPa. Punosvoiman momentin vaikutus: alareunassa puristusta 1,16 MPa. Punosvoimasta yhteensä 6,6 MPa puristusta poikkileikkauksen alareunassa (taulukko 2.8).

Vetojännitys yhteensä $\sigma_{t,yht} = f_{ctk} = 2,9 \text{ MPa} \Rightarrow$ vetojännitys kuormasta $\sigma_{Et} = 2,9 \text{ MPa} + 6,6 \text{ MPa} = 9,5 \text{ MPa}$

Kuorman aiheuttama taivutusmomentti $M_E = \sigma_{Et} \cdot W_{alareuna} = 18,8 \text{ kNm}$

Tuentatapaus, jossa kolminkertainen alustaluku ulokkeen alla \Rightarrow voima kiskon kohdalla $P_k \approx M_E / 0,15 \text{ m} = 125 \text{ kN}$ (kohta 4.2)

Tarkastelu b) Vetojännitys ratapölkyn keskellä yläpinnalla

Halkeamattoman poikkileikkauksen taivutusvastus yläreunan suhteen: $W_{yläreuna} = 0,001006 \text{ m}^3$ (taulukko 2.8)

Punosvoiman vaikutus yläreunan vetojännitykseen: keskeinen puristus 7,7 MPa. Punosvoiman momentin vaikutus: yläreunassa puristusta 2,1 MPa. Punosvoimasta yhteensä 9,8 MPa puristusta poikkileikkauksen yläreunassa (taulukko 2.8).

Vetojännitys yhteensä $\sigma_{t,yht} = f_{ctk} = 2,9 \text{ MPa} \Rightarrow \sigma_{Et} = 2,9 \text{ MPa} + 9,8 \text{ MPa} = 12,7 \text{ MPa}$

Kuorman aiheuttama taivutusmomentti $M_E = \sigma_{Et} \cdot W_{yläreuna} = 12,8 \text{ kNm}$

Tuentatapaus, jossa kiskon vieressä 5- ja 8-kertainen alustaluku \Rightarrow voima kiskon kohdalla $P_k \approx M_E / 0,116 \text{ m} = 110 \text{ kN}$ (vrt. kohta 4.2).

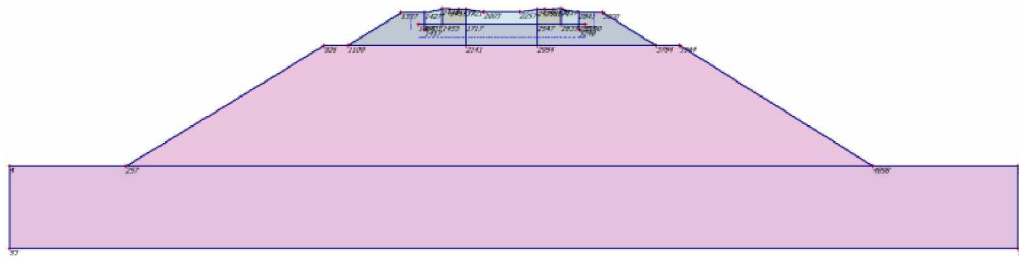
Lasketulla kiskon kohdan voimalla $P_k = 110 \text{ kN}$ ratapölkkyyn ei synny halkeilua, joten sen väsytykestävyys on kirjallisuuslähteiden (Tulonen et al 2013) mukaan hyvä. Kun dynaamisen kuormakertoimen suuruudeksi arvioidaan 1,6 ja tyypillinen akselikuorman jakautuminen kahdelle kiskolle ja peräkkäisille ratapölkkyille, voidaan akselipainon suuruudeksi arvioida $110 \text{ kN} \cdot 2 \cdot 2 / 1,6 = 275 \text{ kN}$.

Raiteen ja ratapenkereen 2D-FEM-laskenta

L3-1 Laskentamallin kuvaus

Maan ja rakenteen yhteistoimintaa voidaan parhaiten tarkastella mallintamalla samaan laskentamalliin sekä rakenne että maakerrokset. Alan kaupallisista sovelluksista valittiin Plaxis 2D-ohjelmisto sen hyvien maamallien ja monipuolisuuden vuoksi. Esimerkiksi ratapölkyn ja tukikerroksen välinen kontaktipinta voitiin mallintaa joko erillisen elementin avulla tai jättää tyhjäksi.

2D-FE-mallin avulla (kuva L3-1) ratapölkky-, raidesepeli- ja pengerosuudet muodostetaan neljästä kerroksesta: ylimpänä on ratapölkkykerros, sen alapuolella raidesepelikkerros, pengerkerros (väli- ja eristyskerros) ja pohjamaakerros. Akselipaino on 250 kN, ja eurokoodin mukainen kerroin γ on 1,46 (EN 1991-2 2004). Tämän pohjalta laskettu kuormitus mallissa radan pituusmetriä kohden on 228,1 kN, joten FE-mallissa käytetty kuorma on suuri.



Kuva L3-1 Plaxis 2D malli.

Laskennan tarkoituksena oli mallintaa ratapölkyn ja maakerrosten käyttäytymistä, kun toistuva liikennekuormitus on aikaansaanut raon ratapölkyn päiden alle. Tätä 2D-FEM-laskentaa hyödynnettiin nelivuotisen tutkimusprojektin alkuvaiheessa ratapölkyn ja penkereen yhteistoiminnan karkeaan arviointiin.

2D-mallin pituus on ääretön (yksi metri / jatkuva), vaikka käytännössä ratapölkkyt ja niiden välinen raidesepeli muodostavat epäjatkuvan kokonaisuuden radan pituussuunnassa. Siksi tässä 2D-mallissa ratapölkkyjä kuvaavan jatkuvan betonilaatan kimmomoduuli muutettiin ratapölkkyjen todellisen jäykkyyden mukaiseksi, ks. taulukko L3-1. Käytetty kolmioelementtityyppi sisältää 15 solmua (nodes) ja 12 rasisusten laskentapistettä (stress points).

Taulukko L3-1 Ratapölkyn kimmomoduuli metriä kohden radassa.

Ratapölkyn BP99 poikkileikkaus (sijainti)	korkeus [m]	yläreunan leveys [m]	leveys poh- jassa [m]	hitaus- momentti [m ⁴]	kimmo- moduuli [MPa]
a-a (150mm pölkyn päästä)	0,215	0,19	0,3	0,000327	37000
Vastaava suorakulmio	0,215	1		0,000828	14611
b-b (500mm pölkyn päästä)	0,235	0,18	0,282	0,000403	37000
Vastaava suorakulmio	0,235	1		0,001081	13783
c-c (850mm pölkyn päästä)	0,208	0,15	0,235	0,000233	37000
Vastaava suorakulmio	0,208	1		0,00075	11486
d-d (1150mm pölkyn päästä)	0,185	0,15	0,235	0,000164	37000
Vastaava suorakulmio	0,185	1		0,000528	11486

Raidesepeli jaettiin radan poikittaissuunnassa kolmeen osaan: vasen puoli, keskialue ja oikea puoli, ks. kuva L3-1 ja kuva L3-6. Raidesepelin reunaosat sisälsivät myös ratapölkyn ulkopuoliset osuudet. Keskialueella on eri ominaisuudet kuin reunoilla, ks. taulukko L3-3. Raidesepelin keskialueen leveydelle käytettiin kahta arvoa, joko 1200 mm (ensimmäinen ryhmä) tai 600 mm (toinen ryhmä). Ensimmäisessä ryhmässä tutkittiin raidesepelin reuna-alueiden eri kimmomoduuliarvoilla tapaukset 1... 5 ja toisessa ryhmässä tapaukset 6... 7.

R_{inter} määrittää rakenteen pinnan kitkakulman tangentin suhteessa maan sisäisen kitkakulman tangenttiin. Tässä tutkimuksessa käytetään kahta erilaista R_{inter} -arvoa, $R_{inter} = 0,5$ ja $0,7$, joista arvoa $R_{inter} = 0,7$ on käytetty ainoastaan tapauksessa 4. Penkereen kimmomoduuli tapauksissa 1...7 on $E = 75$ MPa, vrt. taulukko L3-2.

Taulukko L3-2 Penkereen, pohjamaan ja raidesepelin merkittävimmät materiaaliominaisuudet. Tapaukset 1... 7.

Hardening Soil- maamalli		Pohjamaa	Penger	Tukikerros keski	Tukikerros reunat
γ_{unsat}	[kN/m ³]	22	20	20	20
γ_{sat}	[kN/m ³]	25	23	23	23
E_{50}	[kN/m ³]	75000	75000	150000	vaihtelee
c_{ref}	[kN/m ³]	40	20	20	20
ϕ	[°]	30	45	45	45
ψ	[°]	1	5	5	5
R_{inter}	[-]	1	1	0,5 (0,7)	0,5 (0,7)

L3-2 Tulokset

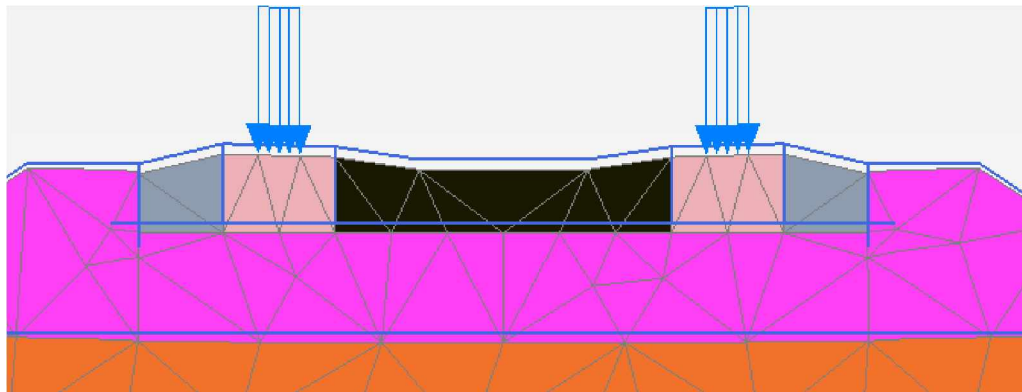
Normaalitapaukset

Ratapölkyn painumat ja jännitykset ratapölkyn keskikohdan yläpinnalla kasvoivat raideseppelin reunaosien kimmomoduulin pienenemisen myötä, ks. taulukko L3-3. Maksimipohjapaineet (tapaukset 1...4) ja ratapölkyn kiskon kohdan pohjan jännitykset puolestaan pienenivät raideseppelin reunaosien kimmomoduulin pienenemisen myötä. Ryhmällä 2 saatiin samankaltaiset tulokset kuin ryhmälle 1, vertaa tapausta 2 tapaukseen 6. Kun raideseppelin keskiosan vahvan tuennan eli suuren pohjapaineen alue puolittuu reuna-alueiden raideseppelin kimmomoduulin pienentyessä 66 % (tapaukset 2 ja 6), on vahvan tuennan leveydellä vain pieniä vaikutuksia ratapölkyn painumiin ja pohjapaineisiin. Mutta kun reuna-alueiden kimmomoduulien suhde on 100, keskituennan leveyden puolittuminen lähes kaksinkertaistaa ratapölkyn painumat ja pohjapaineet (tapaukset 5 ja 7).

Taulukko L3-3 Ratapölkyn painumat, jännitykset ja pohjapaineet raideseppelin reunaosien kimmomoduulin ja tuennan leveyden vaihdellessa. Tässä betoni-jännitykset ovat pienet, koska laskentakimmomoduuli on todellista pienempi, ks. kimmomoduulien suhteet / Taulukko L3-1.

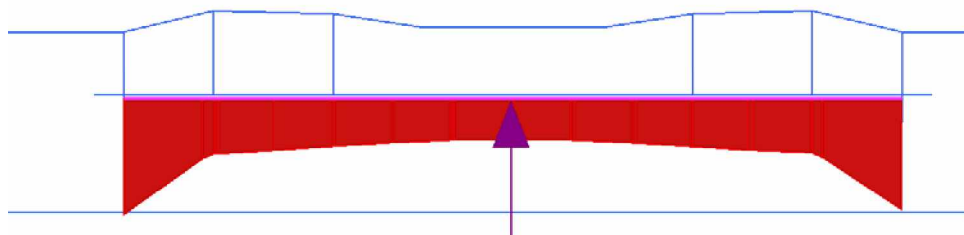
Tapaus	Kimmomoduuli [MN/m ²]		Tukikerroksen keski- osan tuennan leveys [mm]	Painuma pölkyn keskellä [mm]	Painuma pölkyn päissä [mm]	Pölkyn keski- osan ylä- pinnan jännitys [MPa]	Pölkyn kiskon kohdan yläpin- nan jän- nitys [MPa]	Maksi- mi poh- ja- paine [kPa]
	tuki- ker-	tuki- ker-						
1	150	150	–	3,39	3,33	0,23	-1,57	195
2	150	50	1200	4,23	4,35	0,78	-1,46	192
3	150	15 (0,5)	1200	4,16	4,84	2,22	-1,07	189
4	150	15 (0,7)	1200	4,08	4,69	2,05	-1,12	189
5	150	1,5	1200	5,66	7,50	5,16	-0,37	245
6	150	50	600	3,80	3,95	0,87	-1,49	184
7	150	1,5	600	9,66	12,7	6,97	-0,48	412

Positiivinen painuma tarkoittaa tässä siirtymää alaspäin, vrt. kuva L3-2. Positiivinen jännitys pölkyssä tarkoittaa vetojännitystä, vrt. kuva L3-6 (sininen väri).



Kuva L3-2 Painuma, 25-kertainen suurennus. Tapaus 1.

Maksimipohjapaine sijaitsi eri kohdissa eri tapauksissa: tapaukset 1, 2 ja 6: pölkyn päissä (kuva L3-3); tapaukset 3 (kuva L3-5) ja 4: keskiosan reunassa; tapaus 5: 400 mm keskeltä ja tapaus 7: keskellä.



Kuva L3-3 Pohjapaine (max 195 kPa pölkyn päissä) ja resultantti. Tapaus 1.

Tukikerroksen ollessa yhtenäinen (tapaus 1), sijaitsevat ratapölkyn suurimmat jännitykset kiskon kohdalla, ja tukikerroksen ollessa joustava kiskojen alla (tapaukset 3-5) on ratapölkyn suuntainen jännitys suurimmillaan keskikohdalla.

Tapauksen 5 vetojännitys ratapölkyn keskellä yläpinnassa oli $(37000/11500) \cdot 5,16 \text{ MPa} = 17 \text{ MPa}$ muunnettuna pölkyn jännitykseksi jatkuvan laatan jännityksen sijasta. Ratapölkyn esijännitys huomiodenkin näin suuri liikennekuormituksesta aiheutuva vetojännitys synnyttäisi yläpintaan vetohalkeamia.

Kaikki painumat olivat suuria, koska akselikuorma oli suuri ja maakerrosten kimmoduulit melko pienet.

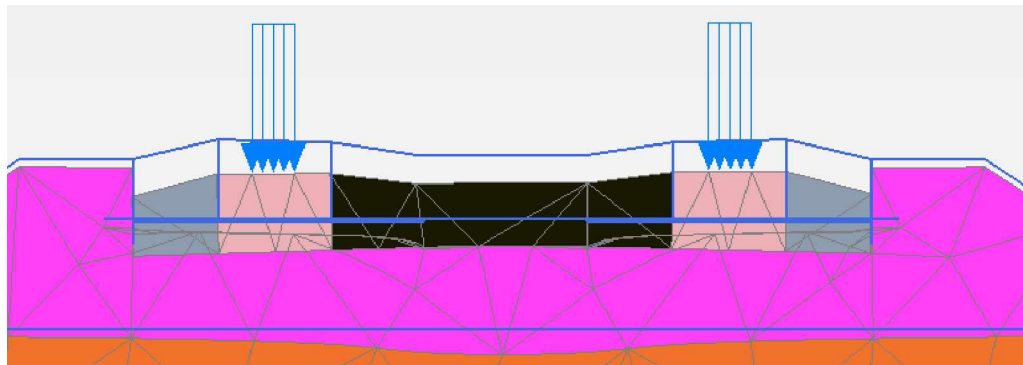
Ratapölkyn päiden alla 10 mm rako

Ratapölkyn päiden alle 1000 mm leveydellä mallinnettiin ratapölkyn ja raidesepelin väliin 10 mm korkea rako. Raidesepeli oli siis kiinni pölkyn alapinnassa keskiosalla 600 mm leveydellä. Sekä penkereen että tukikerroksen kimmomoduulia varioitiin. Jäykemmällä pengermateriaalilla saatiin pienempi painuma ja suurempi pohjapaine. Penkereen kimmomoduulin vaihtelulla (tapaukset 12 ja 13) on enemmän merkitystä painumiin kuin raidesepelin kimmomoduulin vaihtelulla (tapaukset 12 ja 14), vrt. taulukko L3-4. Ratapölkkyjen jännitysten erot olivat pieniä näissä tapauksissa.

Taulukko L3-4 Ratapölkyn painumat, jännitykset ja pohjapaineet raidesepelin ja penkereen kimmomoduulin vaihdellessa. Tässä betonijännitykset ovat pienet, koska laskentakimmomoduuli on todellista pienempi, ks. kimmomoduulien suhteet / Taulukko 3.8.

Tapaus	Kimmomoduuli [MN/m ²]		Painuma pölkyn keskellä [mm]	Painuma pölkyn päissä [mm]	Pölkyn keskiosan yläpinnan jännitys [MPa]	Pölkyn kiskon kohdan yläpinnan jännitys [MPa]	Maksimi pohjapaine [kPa]
	tukikerros	penker					
11	150	100	8,95	12,3	8,0	-0,37	980
12	150	150	7,01	10,3	8,0	-0,40	875
13	150	200	6,09	9,21	7,8	-0,42	1100
14	200	150	6,71	9,82	7,8	-0,41	1300

Maksimipohjapaine sijaitsi kaikissa tapauksissa keskituennan reunassa eli 300 mm keskeltä. Penkereen yläpinnan painuma keskittyi ratapölkyn keskiosan kohdalle, vrt. kuva L3-4.



Kuva L3-4 Painuma, 25-kertainen suurennus. Tapaus 11 (ratapölkkyjen päiden alla 10 mm korkea rako).

Tapauksilla 11 ja 7 on samankaltaiset lähtöarvot ja tulokset. Penkereen yläosan kimmomoduuli tapauksessa 11 oli 1,33-kertainen (100MPa/75MPa), minkä vaikutus näkyy lähinnä keskiosan pohjapainejakautumassa. Erittäin pieni raidesepelin kimmomoduulin arvo ratapölkkyjen päiden alla (tapaus 7) mallintaa siis rakoa hyvin.

Penkereen kimmomoduulin vaikutus

Raidesepelin kimmomoduuli mallinnuksessa on $E = 150$ MPa. Tukikerros on siis tapauksissa 21-24 jäykkä reunasta reunaan. Sen alapuolinen penker jakautuu kahteen päällekkäiseen kerrokseen. Ylemmän kerroksen korkeus on 2 m. Laskennassa tutkitaan käyttäytymistä neljällä ylemmän pengerkerroksen kimmomoduulin arvolla. Ratapölkyn painumat, jännitykset ja pohjapaineet pienenevät kimmomoduulin kasvaessa, mutta vaikutus oli melko pieni, ks. taulukko L3-4.

Taulukko L3-4 Ratapölkyn painumat ja jännitykset penkereen kimmomoduulin vaihdellessa. Tässä betonijännitykset ovat pienet, koska laskentakimmomoduuli on todellista pienempi.

Tapaus	Kimmomoduuli [MN/m ²]		Painuma pölkyn keskellä [mm]	Painuma pölkyn päissä [mm]	Pölkyn kes- kiosan ylä- pinnan jän- nitys [MPa]	Pölkyn kiskon kohdan ylä- pinnan jänni- tys [MPa]
	penger yläosa	penger alaosa				
21	100	100	2,89	2,77	0,17	-1,60
22	150	100	2,76	2,63	0,14	-1,60
23	200	100	2,69	2,55	0,11	-1,60
24	250	100	2,63	2,49	0,11	-1,60

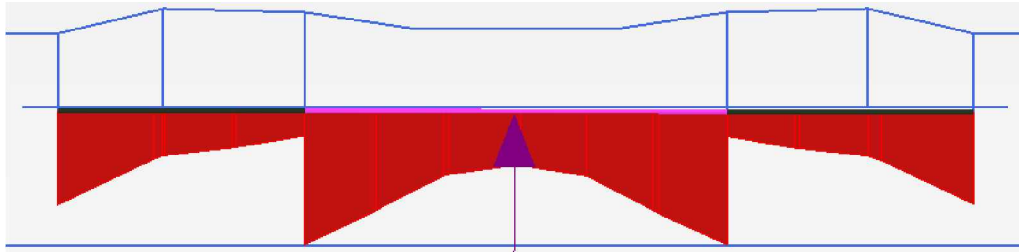
Tapauksen 1 ja 21 ainoa ero on penkereen kimmomoduulin arvo. Jäykempi pengermateriaali pienensi ratapölkyn painumaa, mutta ei merkittävästi vaikuttanut pölkyn jännitystilaan, vrt. taulukko L3-3.

Ratapölkyn pohjakitkan vaikutus

Tapaukset 3 ja 4 valittiin erikoistapauksiksi. Penkereen, pohjamaan ja raidesepelin materiaaliominaisuudet on esitetty edellä: ks. taulukko L3-2. Raidesepelin tuennan leveys keskellä on 1200 mm. Ainoa ero tapauksen 3 ja 4 välillä on R_{inter} :n arvon muuttuminen. Tapauksessa 3 R_{inter} :n arvo on 0,5 ja tapauksessa 4 arvo on 0,7.

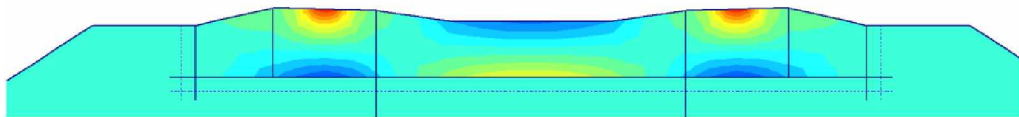
Kitka: $R_{inter} = 0,5$

Tehokas normaalijännitys ratapölkyn ja maan rajapinnassa (pohjapaine) vaihtelee selvästi ratapölkyn pituuden matkalla, ks. kuva L3-5. Ison kimmomoduulin alueen eli keskialueen reunassa pohjapaine on suurempi kuin ratapölkyn keskikohdalla ja ratapölkyn päiden alla.



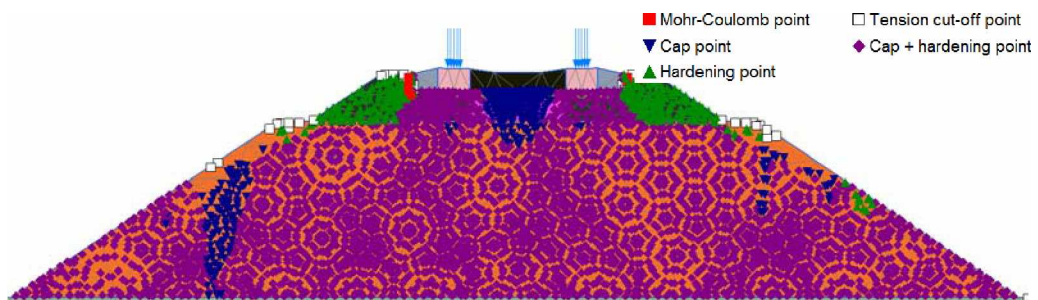
Kuva L3-5 Normaalijännitykset ratapölkyn pohjalla eli pohjapaineet, kun $R_{inter} = 0,5$. Tapaus 3.

Ratapölkyn jännitykset ovat suurimmat kuormituskohdissa ja ratapölkyn keskellä. Suurin puristusjännitys sijaitsee kiskon kohdilla yläpinnassa ja ratapölkyn keskellä alapinnassa, ks. kuva L3-6.



Kuva L3-6 Jännitykset ratapölkkyssä, $R_{inter} = 0,5$. Tapaus 3.

Plastisoituneimmat kohdat (Tension cut-off) sijaitsevat pääasiassa pengerkerroksen ja tukikerroksen yläosan reunoilla, ks. kuva L3-7. Suuri kolmiakσιαalinen puristusjännitystila sijaitsee tukikerroksessa ratapölkyn keskiosan alapuolella.



Kuva L3-7 Plastisoituneet pisteet (plastic points), $R_{inter} = 0,5$. Tapaus 3.

Vertailulaskenta, kitka: $R_{inter} = 0,7$

Kun R_{inter} on 0,7, pohjapaineiden ja ratapölkyn jännitysten jakautuminen on samanlainen kuin tapauksessa $R_{inter} = 0,5$. Plastisoituminen maakerroksissa on hieman erilainen.

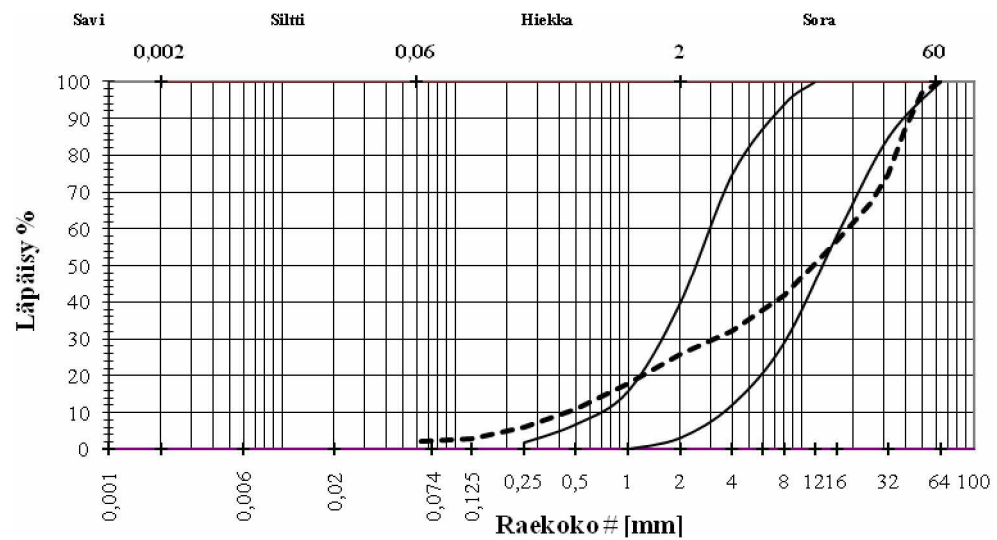
L3-3 2D-FEM-laskennan johtopäätökset

1. Kun tukikerroksen materiaali oli samanlaista koko ratapenkereen alueella, olivat pölkyn jännitykset melko pienet.
2. Tämän perustapauksen lisäksi tutkittiin tapaukset, joissa raidesepelin kimmomoduuli penkereen reunoilla vaihteli: $E_{reuna} = 150 \text{ MPa}$, 50 MPa , 15 MPa ja $1,5 \text{ MPa}$. Samanaikaisesti raidesepelin kimmomoduuli keskiosalla oli $E_{keski} = 150 \text{ MPa}$ ja penkereen kimmomoduuli oli $E_{penger} = 75 \text{ MPa}$. Ratapölkyn painuma sekä keskikohdassa että varsinkin päissä kasvoi selvästi, kun E_{reuna} pieneni. Vastaa- vasti ratapölkyn keskellä yläpinnan vetojännitykset kasvoivat ja kiskon kohdan jännitykset pienenivät. Suurimmat muutokset tapahtuivat, kun raidesepelin reunoilla kimmomoduuli E_{reuna} pieneni arvosta 15 MPa arvoon $1,5 \text{ MPa}$, jolloin ratapölkyn päiden painuma kasvoi miltei kaksinkertaiseksi. Raidesepelin jäykkyyden ratapölkyn päiden alla ollessa hyvin pieni, esim. $E_{reuna} = 1,5 \text{ MPa}$, myös keskiosan vahvan tuennan leveyden merkitys oli suurimmillaan. Täten ratapölkyn suunnittelun lähtötietona pitää olla arvio raidesepelin aikaansaamasta ratapölkyn tuennasta ja pitkäaikaisesta toiminnasta.
3. Raidesepelin alapuolisen penkereen jäykkyyden pieneneminen kasvattaa raiteen painumia, kun raidesepeli on jauhautunut hienorakeiseksi ja painunut kiskonkohtien alla. Kun 10 mm korkea rako mallinnettiin ratapölkkyjen päiden alle, saatiin selville että penkereen yläosan (välikerros) kimmomoduulin vaihtelulla oli edellisen lisäksi vaikutusta ratapölkyn käyttäytymiseen.
4. Kun ratapölkyn päiden alla oli rako tai tukikerroksen kimmomoduuli oli erittäin pieni, syntyi pölkyn yläpintaan keskelle halkeilua vastaava vetojännitys.
5. Ratapölkyn pohjan kitkalla on pieni vaikutus ratapölkyn käyttäytymiseen, kun suhteellinen kitka kasvaa arvosta $0,5$ arvoon $0,7$. Mutta mainitulla ratapölkyn alapinnan kitkan muutoksella on suurehko vaikutus penkereen sisäisiin muodonmuutoksiin. Useita plastisia pisteitä syntyi penkereen yläosan reuna-alueille, kun kitka oli pienehkö. Kun kitkaa lisättiin, plastisia pisteitä ilmestyi myös alempaan pengerkerrokseen penkereen reunoille sekä ratapölkyn keskiosan alle.

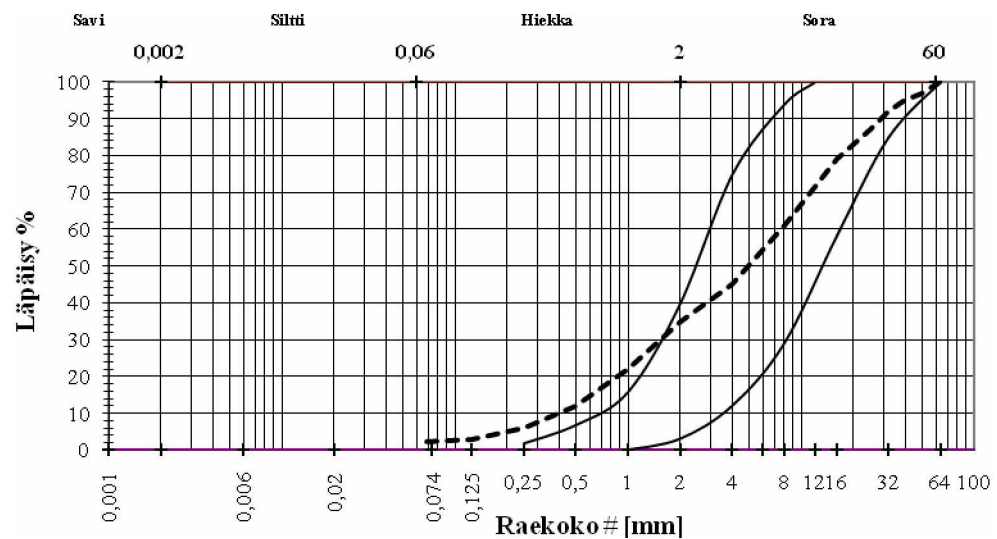
Näiden laskentojen tuloksia on tässä raportissa myös verrattu mittaustuloksiin, ks. kohta 3.2.4 ja taulukko 3.8.

Valtimon koekohteen tukikerrosnäytteiden ra- keisuuskäyrät.

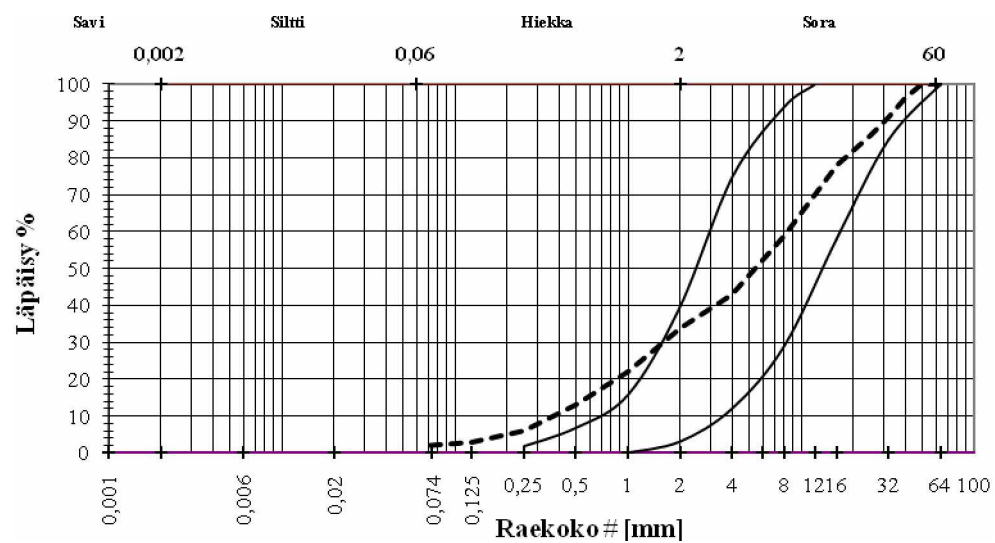
Valtimo km 809+180 Tukikerros: raidesora, Pölkky: B97.



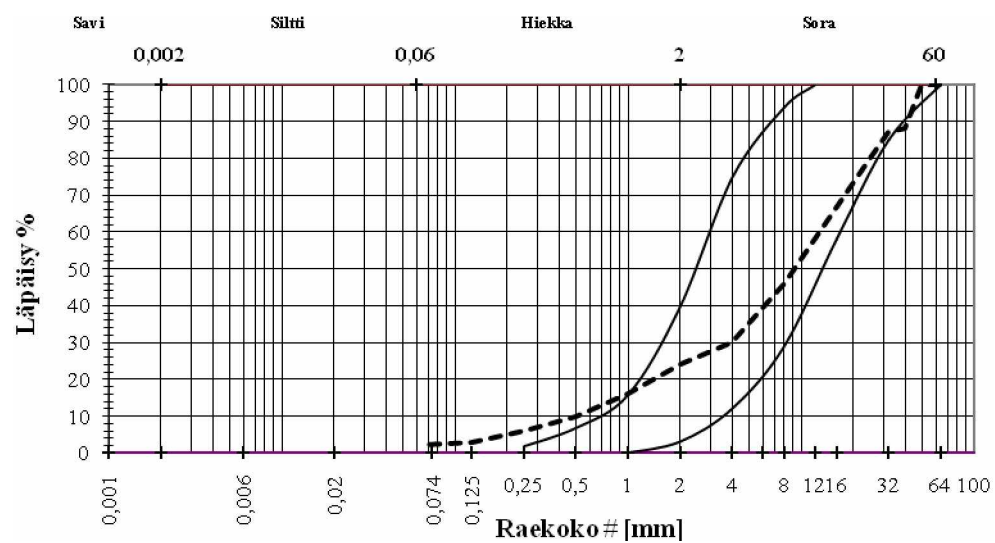
Valtimo km 809+327 Tukikerros: raidesora, Pölkky: B97.



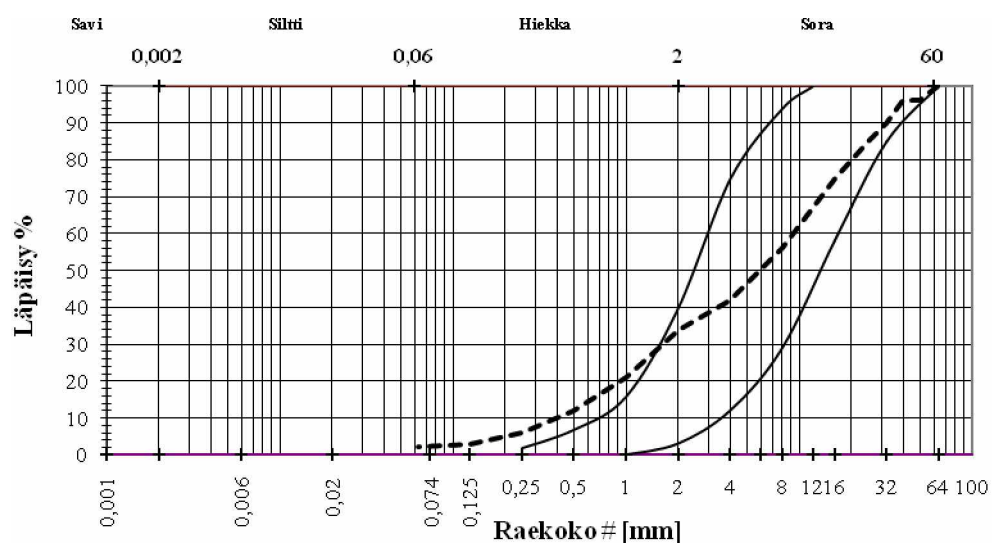
Valtimo km 809+552 Tukikerros: raidesora, Pölkky: B97.



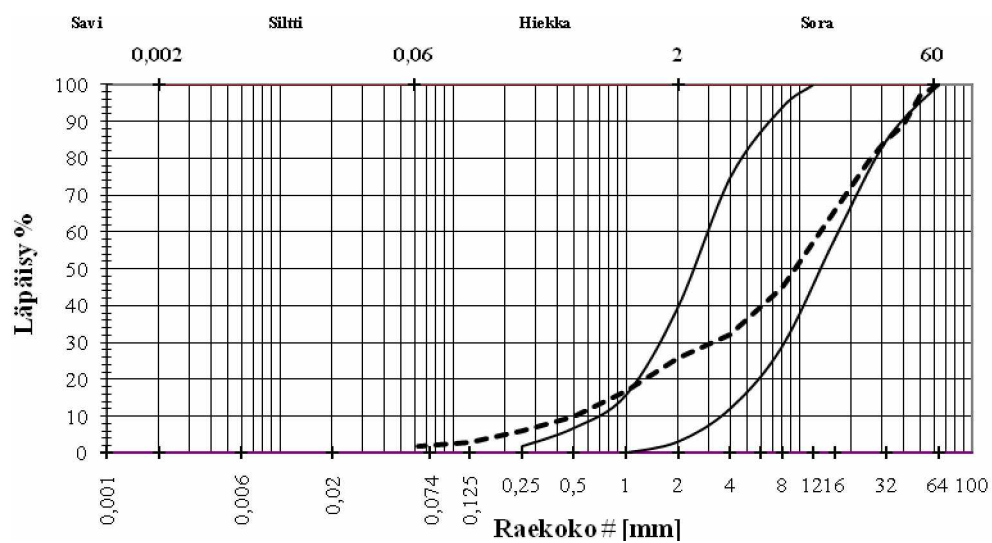
Valtimo km 809+682 Tukikerros: raidesora, Pölkky: soraraidepölkky BP99.



Valtimo km 809+870 Tukikerros: raidesora, Pölkky: soraraidepölkky BP99.

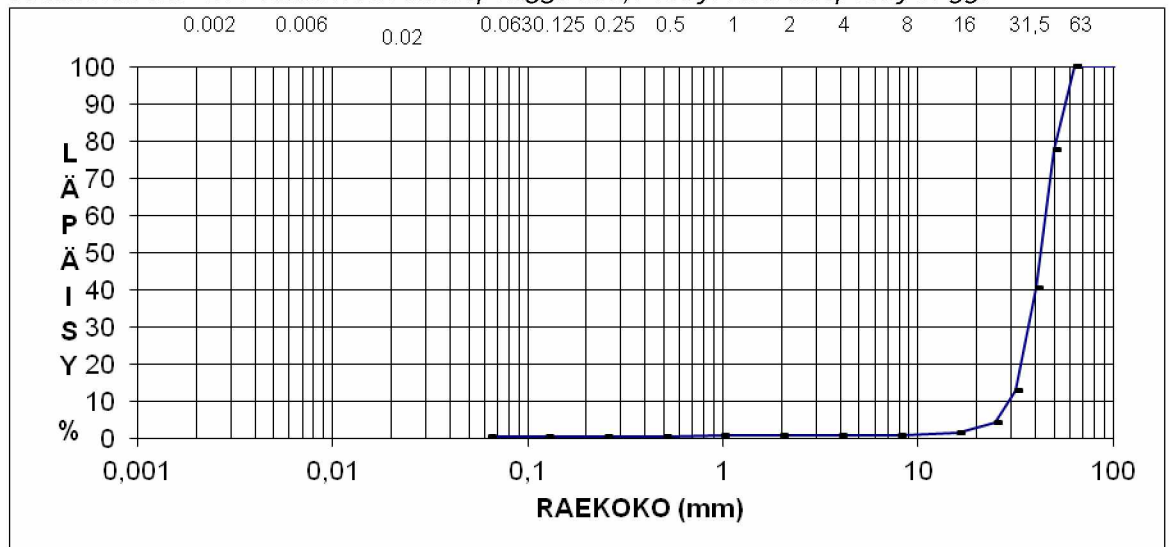


Valtimo km 810+090 Tukikerros: raidesora, Pölkky: soraraidepölkky BP99.

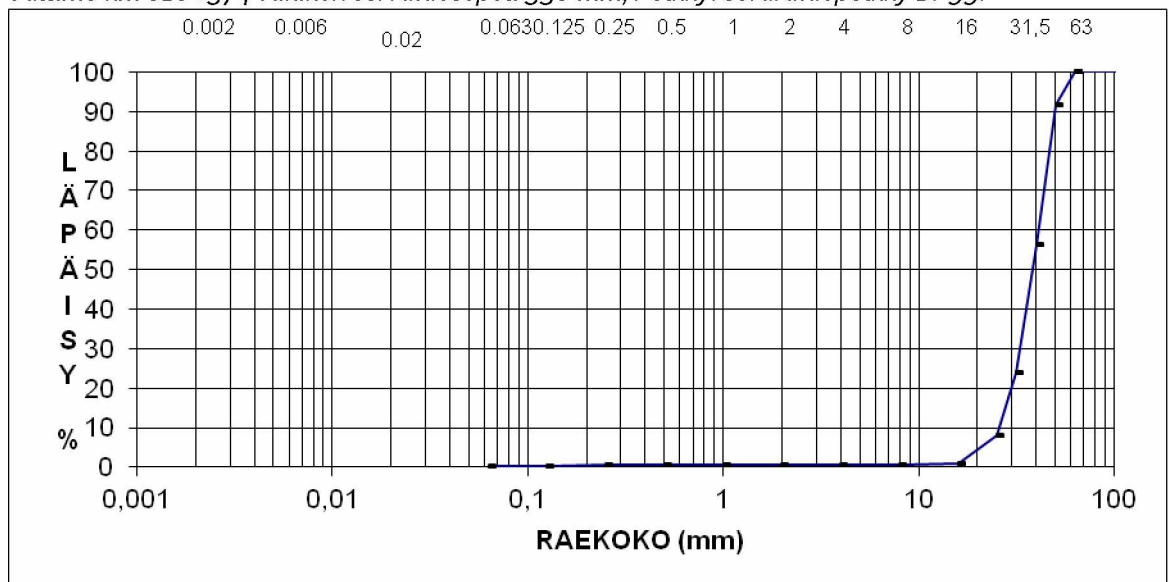


Sepelitukikerrososuuuden näytteet ovat otettu ratapölyn alapinnan alapuolelta. Näytteitä ei kuitenkaan ole otettu niin syvältä, että näytteissä olisi ratapölkkyjen tuennan yhteydessä tukikerroksen sepeliin sekoittunutta raidesoraa.

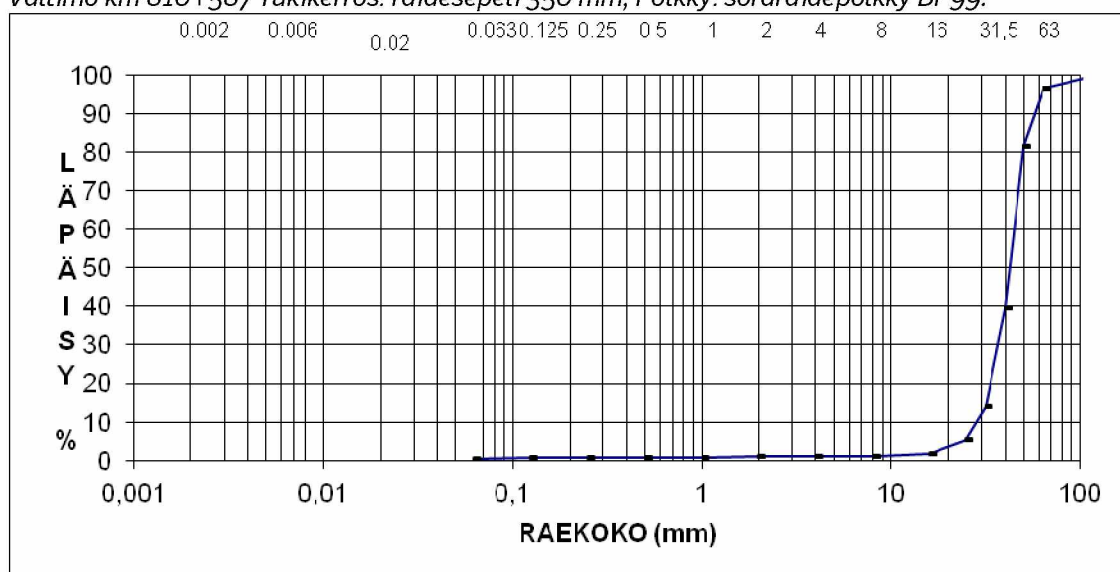
Valtimo km 810+160 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: soraraidepölkky BP99.



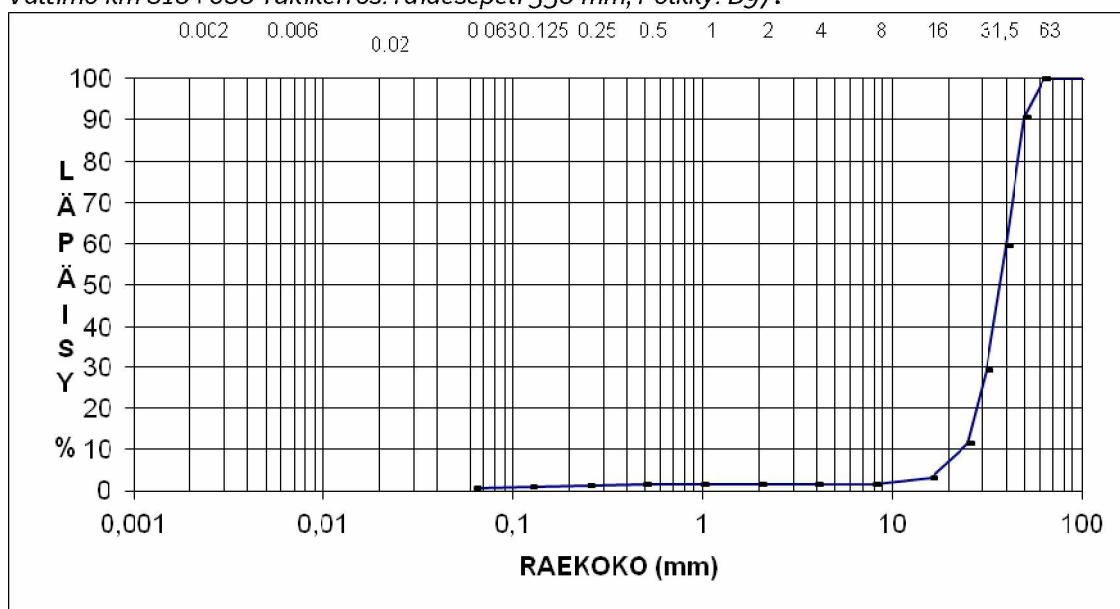
Valtimo km 810+374 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: soraraidepölkky BP99.



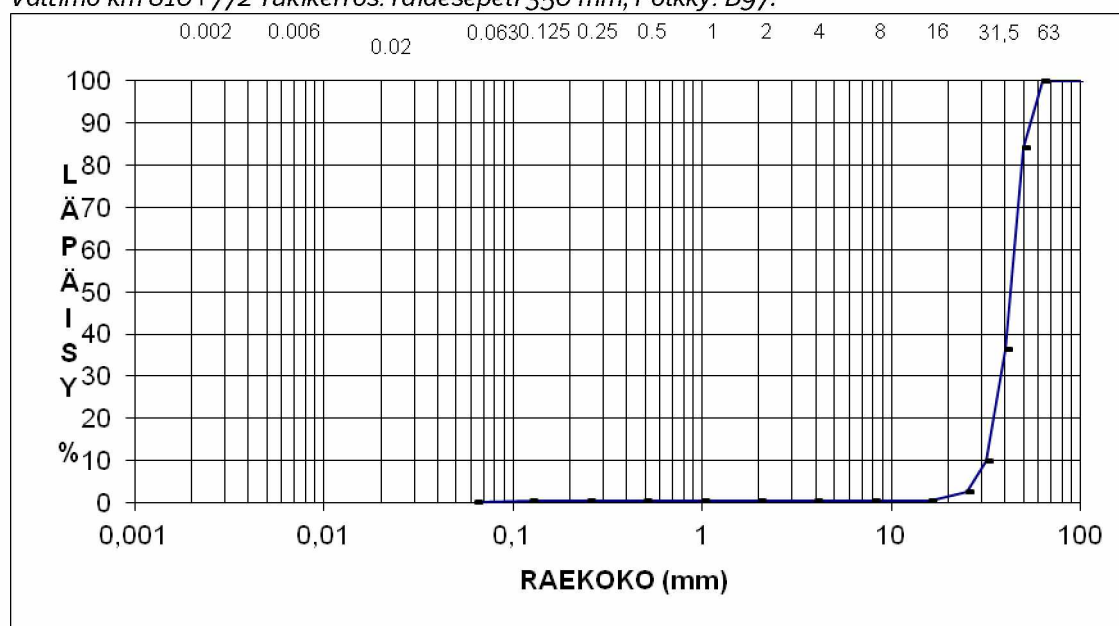
Valtimo km 810+587 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: soraraidepölkky BP99.



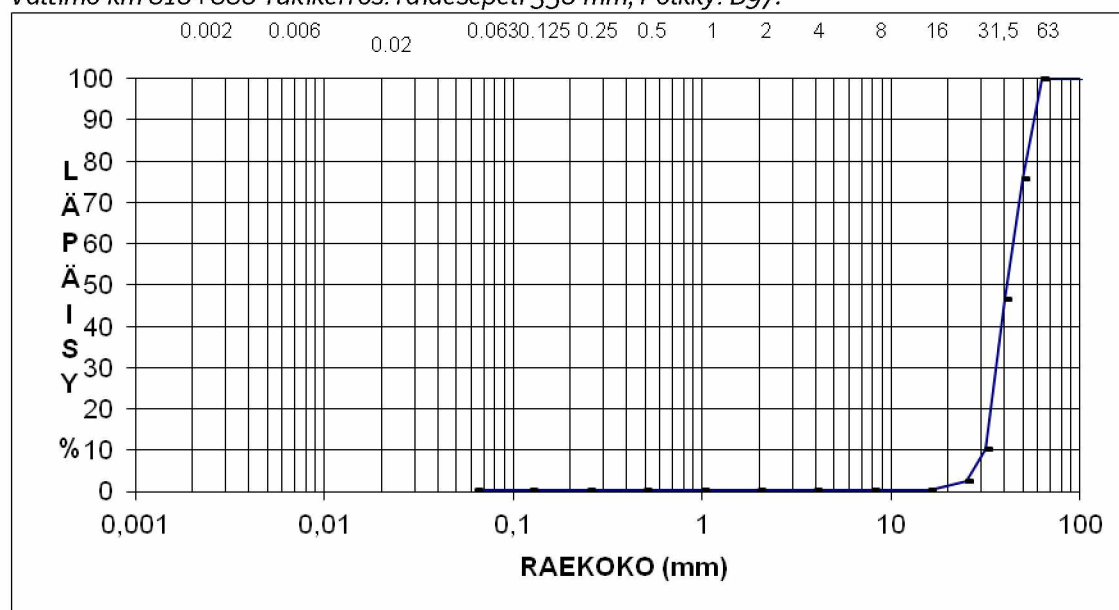
Valtimo km 810+680 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: B97.



Valtimo km 810+772 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: B97.



Valtimo km 810+880 Tukikerros: raidesepeli 350 mm, Pölkky: B97.



Ohuthienäyteraportit

Tilaaja: Tampereen Teknillinen Yliopisto Rakennustekniikan laitos PL 599 33101 TAMPERE	Tilaus/ pvm.: Arto Köliö/16.01.2012 Näytteiden saap.pvm.: 17.01.2012
Kohde: Ratapölkkyt	
Tehtävä: Mikrorakennetutkimus ohuthieestä, 16 kpl; testaus 08. – 14.02.2012	

Näytteet

Tilaajan toimittamina ja merkitseminä 16 kpl näytteitä ratapölkkyistä. Näytteet olivat porauslieriöitä, joiden halkaisija oli 50 mm. Näytteet arvioitiin suunniteltuun testaukseen soveltuviksi.

Tutkimukset

Näytteistä valmistettiin esi-impregnoitien jälkeen noin 0,025 mm paksut ohuthienäytteet 75 mm (pituus) x 25 mm (leveys) kokoisille näytelaseille. Ohuthieet tutkittiin polarisaatiomikroskoopilla. Tutkimuksissa noudatettiin standardia *ASTM C 856-04* soveltuvien osin.

Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:llä on FINAS-akkreditointi ohuthietutkimuksille (akkreditoitu testauslaboratorio T208, *SFS-EN ISO/IEC 17025*).

Tulokset

Tutkimustulokset koskevat tähän toimeksiantoon sisältyneitä ohuthienäytteitä.

Ohuthietutkimukset

Näyte 1/3, pölkky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 70 – 74 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0 – 1 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 0,70 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi määrittämissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<2,7 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Lisäksi näytteessä on yksi oliviinidiabaasirake, kooltaan noin 6 mm x 11 mm. Sideaine-runkoainet kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on koko näytteen syvyydellä noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <1 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 2/2 y, pölkky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

Näyte on katkennut poratessa noin 17 – 18 mm:n syvyydeltä yläpinnasta. Liimattu uudelleen yhteen harmaalla liimamassalla. Liimatun sauman leveydeksi on jäänyt 0,25 mm – 3,3 mm.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laukukkaasti noin 0 – 3 mm:n syvyyteen. Karbonatisoituminen on edennyt halkeamia ja kiviainesrakeiden ulkopintoja pitkin.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 1,5 mm), jotka edustavat pakkasenkestävyyden kannalta osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<3,6 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.

- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on yläpinnasta noin 18,5 – 24,5 mm:n syvyydessä yläpinnan suuntaisen <0,01 mm leveä ja yli 25 mm pitkä haarautuva ja kiviainesrakeiden ulkopintoja seuraileva mikrohal-keama.
Noin 11 – 17 mm:n syvyydessä yläpinnasta on yläpintaa vastaan kohtisuora <0,01 mm leveä mikrohalkeama, joka lähtee liimasaumasta kohti näytteen yläpintaa. Koko näytteen syvyydellä on noin 16 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 2/2 a, pölky B97, alapinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 0 – 1 mm:n syvyyteen ja alapinnasta lähtevää mikrohalkeamaa pitkin noin 10 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, pääasiassa harvakseltaan pyöreitä huokosia (Ø 0,04 – 2,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täytekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 10 mm:n syvyydessä 2 kpl alapintaa vastaan kohtisuoraa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 1,5 mm ja 10 mm. Koko näytteen syvyydellä on noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 3/3, pölky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,5 – 2 mm:n syvyyteen ja yläpinnasta lähtevää mikrohalkeamaa pitkin noin 9 mm:n syvyyteen.

- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,08 – 2,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Yhdessä huokostilassa noin 20 mm:n syvyydessä yläpinnasta on <0,01 mm paksuja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia tätekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 9 mm:n syvyydessä 2 kpl alapintaa vastaan kohtisuoraa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 4 mm ja 9 mm. Koko näytteen syvyydellä on noin 18 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.
Näytteen reunassa olevassa kivrakeessa on noin 66 – 70 mm:n syvyydessä 0,01 mm leveä ja yli 5 mm pitkä mikrohalkeama, joka etenee noin 0,5 mm kivirakeita ympäröivään betoniin. Halkeama jatkuu kivrakeessa ohuthienäytteen ulkopuolelle jääneeseen osaan.

Näyte 4/3, pölkky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1992

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,5 – 3,5 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<3,6 mm).
- Huokostiloissa ei ole tätekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja kiillegneissi. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 1 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpintaa vastaan kohtisuoraa <0,01 mm leveä ja noin 1 mm pitkä mikrohalkeama. Lisäksi 0 – 35 mm:n syvyydellä on noin 11 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <0,5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 5/3, pölkky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 71 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,1 – 1 mm:n syvyyteen ja kivirakeiden pinnassa olevaa halkeamaa pitkin noin 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen melko runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 1,5 mm), jotka edustavat osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta. Lisäksi on yksi pitkänomainen huokostila, jonka pituus on noin 2,0 mm.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täytekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Lisäksi on mm. kolme oliviinidiabaasi-raetta ja yksi kvartsiittirae. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 4 mm:n syvyydessä 2 kpl kivrakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 2 mm ja 6 mm. Lisäksi 0 – 47 mm:n syvyydellä on 5 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <1,5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 6/3 y, pölkkö BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1,5 – 3 mm:n syvyyteen ja betonissa olevia kahta halkeamaa pitkin noin 10 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,09 – 1,5 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi määrittämissä olosuhteissa.
- Muutamissa huokostiloissa noin 54 – 61 mm:n syvyydessä yläpinnasta on <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täytekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Lisäksi on 1 kpl oliviinidiabaasirae. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 17 mm:n syvyydessä 3 kpl yläpinnasta alkavaa ja kivrakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 2 mm, 14 mm ja 21 mm. Lisäksi 13 – 55 mm:n syvyydellä on 10 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 6/3 a, pölkky BP89, alapinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyysuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 2 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,6 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<2,0 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti noin 6 – 74 mm:n syvyydessä alapinnasta <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja kiilleliuske. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 5 – 60 mm:n syvyydellä noin 17 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 8/3, pölkky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1994

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 74 mm (= ulottuvuus syvyysuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1,5 – 13 mm:n syvyyteen, osittain betonissa olevia halkeamia pitkin.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,05 – 1,0 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi pitkänomainen huokostila, jonka pituus noin 1,4 mm.
- Huokostiloissa ei ole täyte kiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 5 mm:n syvyydessä 3 kpl yläpinnasta alkavaa ja kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 3 – 5 mm. Lisäksi 10 – 54 mm:n syvyydellä on 11 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 9/3, pölkky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1997

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,02 – 1,5 mm), jotka edustavat osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Lisäksi on yksi oliviinidiabaasirae. Sideaine-runkoainekontaktit ovat ehjiä.
- Betonissa on 44 – 62 mm:n syvyydellä 3 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 10/3, pölkky BV75, yläpinta, valmistusvuosi 1977

Näytteen pituus ohuthieessä on 74 – 75 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0 – 0,4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,03 – 1,4 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia huokostiloja (<5,9 mm).
- Osassa huokostiloja on 0 – 32 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajina on graniitti. Hienoa kiviainesta on tavanomaista vähemmän. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.

- Betonissa on koko näytteen syvyydeltä runsaasti (>80 kpl) erisuuntaisia <0,01 mm leveitä ja pääasiassa 0,1 – 1 mm pitkiä mikrohalkeamia. Halkeamat ovat enimmäkseen kahden kiviainesrakeen tai huokosen välissä. 0 – 5 mm:n syvyydessä on yksi noin 5 mm pitkä ja <0,01 mm leveä yläpintaa vastaan kohtisuora ja ison kiviainesrakeen rikkova mikrohalkeama. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 11/3 y, pölkky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1990

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,09 – 1,0 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Osassa huokostiloja on 6 – 12 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyttekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumisesta betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Lisäksi on kaksi diabaasiraetta. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on koko näytteen syvyydeltä noin 23 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkä mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 11/3 a, pölkky BP89, alapinta, valmistusvuosi 1990

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 2 – 5 mm:n syvyyteen ja alapinnasta alkavia halkeamia pitkin noin 6 – 12 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,08 – 1,3 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi epämääräisen muotoinen tiivistyshuokonen, jonka pituus on noin 2,1 mm.
- Osassa huokostiloja on 9 – 68 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyttekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumisesta betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.

- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 12 mm:n syvyydessä 3 kpl alapinnasta alkavaa ja kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 5 – 13 mm. Lisäksi on noin 6 – 40 mm:n syvyydellä noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 12/3, pölkkö BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1991

Näytteen pituus ohuthieessä on 67 – 69 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0 – 1,5 mm:n syvyyteen ja yläpinnasta alkavaa kahta halkeamaa pitkin noin 2,5 – 3 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,05 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi pikänomainen tiivistyshuokonen, jonka pituus on noin 3,3 mm.
- Huokostiloissa on yleisesti noin 13 – 60 mm:n syvyydellä <0,05 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyttekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 61 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpinnasta alkava yläpintaa vastaan kohtisuora osittain kiviainesrakeita rikkova, osittain niiden ulkopintoja seuraileva <0,04 mm leveä mikrohalkeama, joka on todennäköisesti seurausta ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta.
Lisäksi on noin 1,5 – 42 mm:n syvyydellä noin 14 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <7 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 13, pölkkö BP99, yläpinta, valmistusvuosi 2009, käyttämätön

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyyssuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0,1 – 6 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 2,2 mm), jotka edustavat epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta.
- Huokostiloissa ei ole täyttekiteytymiä.

- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi, amfiboliitti ja oliviinidiabaasi. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 5 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpinnasta alkava ja ison kivirakeen ulkopintaa seuraava <0,01 mm leveä mikrohalkeama, joka on todennäköisesti seurausta ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta. Yläpinnan kohdassa, josta halkeama alkaa on 0,3 mm syvä ja 1 mm leveä syvennys. Heti syvennyksen alla halkeamassa on useita lyhyitä haarautumia. Muualla näytteen yläpinnassa on sileä sementtiliima. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 14, pölky B97, yläpinta, valmistusvuosi 2009, käyttämätön

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyysuunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 2 – 5 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Huokostiloissa ei ole täyttekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat ehjiä.
- Betonissa ei esiinny halkeilua.

Tilaaja: Tampereen Teknillinen Yliopisto Rakennustekniikan laitos PL 599 33101 TAMPERE	Tilaus/ pvm.: Arto Köliö/16.01.2012 Näytteiden saap.pvm.: 17.01.2012
Kohde: Ratapölkkyt	
Tehtävä: Mikrorakennetutkimus ohuthieestä, 16 kpl; testaus 08. – 14.02.2012	

Näytteet

Tilaajan toimittamina ja merkitseminä 16 kpl näytteitä ratapölkkyistä. Näytteet olivat porauslieriöitä, joiden halkaisija oli 50 mm. Näytteet arvioitiin suunniteltuun testaukseen soveltuviksi.

Tutkimukset

Näytteistä valmistettiin esi-impregnointien jälkeen noin 0,025 mm paksut ohuthienäytteet 75 mm (pituus) x 25 mm (leveys) kokoisille näytelaseille. Ohuthieet tutkittiin polarisaatiomikroskoopilla. Tutkimuksissa noudatettiin standardia *ASTM C 856-04* soveltuvien osien.

Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:llä on FINAS-akkreditointi ohuthietutkimuksille (akkreditoitu testauslaboratorio T208, *SFS-EN ISO/IEC 17025*).

Tulokset

Tutkimustulokset koskevat tähän toimeksiantoon sisältyneitä ohuthienäytteitä.

Ohuthietutkimukset

Näyte 1/3, pölky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 70 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0 – 1 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 0,70 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi määrittämissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<2,7 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia tätekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Lisäksi näytteessä on yksi oliviinidiabaasirake, kooltaan noin 6 mm x 11 mm. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on koko näytteen syvyydellä noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <1 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 2/2 y, pölky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

Näyte on katkennut poratessa noin 17 – 18 mm:n syvyydeltä yläpinnasta. Liimattu uudelleen yhteen harmaalla liimamassalla. Liimatun sauman leveydeksi on jäänyt 0,25 mm – 3,3 mm.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0 – 3 mm:n syvyyteen. Karbonatisoituminen on edennyt halkeamia ja kiviainesrakeiden ulkopintoja pitkin.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 1,5 mm), jotka edustavat pakkasenkestävyyden kannalta osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<3,6 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia tätekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.

- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on yläpinnasta noin 18,5 – 24,5 mm:n syvyydessä yläpinnan suuntaisen <0,01 mm leveä ja yli 25 mm pitkä haarautuva ja kiviainesrakeiden ulkopintoja seuraileva mikrohal-keama.
Noin 11 – 17 mm:n syvyydessä yläpinnasta on yläpintaa vastaan kohtisuora <0,01 mm leveä mikrohalkeama, joka lähtee liimasaumasta kohti näytteen yläpintaa. Koko näytteen syvyydellä on noin 16 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 2/2 a, pölkky Bg7, alapinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 0 – 1 mm:n syvyyteen ja alapinnasta lähtevää mikrohalkeamaa pitkin noin 10 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, pääasiassa harvakseltaan pyöreitä huokosia (Ø 0,04 – 2,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi määrittämissä olosuhteissa.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 10 mm:n syvyydessä 2 kpl alapintaa vastaan kohtisuoraa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 1,5 mm ja 10 mm. Koko näytteen syvyydellä on noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 3/3, pölkky BP8g, yläpinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,5 – 2 mm:n syvyyteen ja yläpinnasta lähtevää mikrohalkeamaa pitkin noin 9 mm:n syvyyteen.

- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,08 – 2,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Yhdessä huokostilassa noin 20 mm:n syvyydessä yläpinnasta on <0,01 mm paksuja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia tätekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 9 mm:n syvyydessä 2 kpl alapintaa vastaan kohtisuoraa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 4 mm ja 9 mm. Koko näytteen syvyydellä on noin 18 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.
Näytteen reunassa olevassa kivirakeessa on noin 66 – 70 mm:n syvyydessä 0,01 mm leveä ja yli 5 mm pitkä mikrohalkeama, joka etenee noin 0,5 mm kiviraketta ympäröivään betoniin. Halkeama jatkuu kivirakeessa ohuthienäytteen ulkopuolelle jääneeseen osaan.

Näyte 4/3, pölky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1992

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,5 – 3,5 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<3,6 mm).
- Huokostiloissa ei ole tätekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja kiillegneissi. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 1 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpintaa vastaan kohtisuora <0,01 mm leveä ja noin 1 mm pitkä mikrohalkeama. Lisäksi 0 – 35 mm:n syvyydellä on noin 11 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <0,5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 5/3, pölkky Bg7, yläpinta, valmistusvuosi 1998

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 71 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0,1 – 1 mm:n syvyyteen ja kivirakeiden pinnassa olevaa halkeamaa pitkin noin 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen melko runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,04 – 1,5 mm), jotka edustavat osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta. Lisäksi on yksi pitkänomainen huokostila, jonka pituus on noin 2,0 mm.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täytekiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Lisäksi on mm. kolme oliviinidiabaasi-raetta ja yksi kvartsiittirae. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 4 mm:n syvyydessä 2 kpl kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 2 mm ja 6 mm. Lisäksi 0 – 47 mm:n syvyydellä on 5 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <1,5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 6/3 y, pölkky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1,5 – 3 mm:n syvyyteen ja betonissa olevia kahta halkeamaa pitkin noin 10 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,09 – 1,5 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Muutamissa huokostiloissa noin 54 – 61 mm:n syvyydessä yläpinnasta on <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täytekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Lisäksi on 1 kpl oliviinidiabaasirae. Sideainerunkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.

- Betonissa on 0 – 17 mm:n syvyydessä 3 kpl yläpinnasta alkavaa ja kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 2 mm, 14 mm ja 21 mm. Lisäksi 13 – 55 mm:n syvyydellä on 10 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 6/3 a, pölkky BP89, alapinta, valmistusvuosi 1993

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 2 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,6 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia (<2,0 mm).
- Huokostiloissa on yleisesti noin 6 – 74 mm:n syvyydessä alapinnasta <0,02 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteen indikoivat kosteuden kulkeutuminen betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja kiilleliuske. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 5 – 60 mm:n syvyydellä noin 17 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 8/3, pölkky BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1994

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1,5 – 13 mm:n syvyyteen, osittain betonissa olevia halkeamia pitkin.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,05 – 1,0 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi pitkänomainen huokostila, jonka pituus noin 1,4 mm.
- Huokostiloissa ei ole täyte kiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.

- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 5 mm:n syvyydessä 3 kpl yläpinnasta alkavaa ja kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 3 – 5 mm. Lisäksi 10 – 54 mm:n syvyydellä on 11 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 9/3, pölky B97, yläpinta, valmistusvuosi 1997

Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on epätasaisesti jakautuneena, paikoitellen runsaasti pyöreitä huokosia (\varnothing 0,02 – 1,5 mm), jotka edustavat osittain epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta.
- Huokostiloissa on yleisesti koko näytteen syvyydeltä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Lisäksi on yksi oliviinidiabaasirae. Sideaine-runkoainekontaktit ovat ehjiä.
- Betonissa on 44 – 62 mm:n syvyydellä 3 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <5 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 10/3, pölky BV75, yläpinta, valmistusvuosi 1977

Näytteen pituus ohuthieessä on 74 – 75 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0 – 0,4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,03 – 1,4 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkaskestäväksi määrittämissä olosuhteissa. Lisäksi on muutamia epämääräisen muotoisia huokostiloja (<5,9 mm).
- Osassa huokostiloja on 0 – 32 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.

- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajina on graniitti. Hienoa kiviainesta on tavanomaista vähemmän. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on koko näytteen syvyydeltä runsaasti (>80 kpl) erisuuntaisia <0,01 mm leveitä ja pääasiassa 0,1 – 1 mm pitkiä mikrohalkeamia. Halkeamat ovat enimmäkseen kahden kiviainesrakeen tai huokosen välissä. 0 – 5 mm:n syvytydessä on yksi noin 5 mm pitkä ja <0,01 mm leveä yläpintaa vastaan kohtisuora ja ison kiviainesrakeen rikkova mikrohalkeama. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 11/3 y, pölkkö BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1990

Näytteen pituus ohuthieessä on 72 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 1 – 4 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,09 – 1,0 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Osassa huokostiloja on 6 – 12 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Lisäksi on kaksi diabaasiraetta. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on koko näytteen syvyydeltä noin 23 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <2 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 11/3 a, pölkkö BP89, alapinta, valmistusvuosi 1990

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut alapinnasta noin 2 – 5 mm:n syvyyteen ja alapinnasta alkavia halkeamia pitkin noin 6 – 12 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,08 – 1,3 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi epämääräisen muotoinen tiivistyshuokonen, jonka pituus on noin 2,1 mm.

- Osassa huokostiloja on 9 – 68 mm:n syvyydellä <0,01 mm paksuja yksittäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoaine-kontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 12 mm:n syvyydessä 3 kpl alapinnasta alkavaa ja kivirakeiden ulkopintoja seurailevaa <0,01 mm leveää mikrohalkeamaa. Halkeamien pituudet ovat noin 5 – 13 mm. Lisäksi on noin 6 – 40 mm:n syvyydellä noin 20 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <3 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 12/3, pölkkö BP89, yläpinta, valmistusvuosi 1991

Näytteen pituus ohuthieessä on 67 – 69 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 0 – 1,5 mm:n syvyyteen ja yläpinnasta alkavaa kahta halkeamaa pitkin noin 2,5 – 3 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,05 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa. Lisäksi on yksi pikänomainen tiivistyshuokonen, jonka pituus on noin 3,3 mm.
- Huokostiloissa on yleisesti noin 13 – 60 mm:n syvyydellä <0,05 mm paksuja yksittäisiä ja kehämäisiä ettringiitin kaltaisia täyte kiteytymiä. Täytteet indikoivat kosteuden kulkeutumista betonissa.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 61 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpinnasta alkava yläpintaa vastaan kohtisuora osittain kiviainesrakeita rikkova, osittain niiden ulkopintoja seuraileva <0,04 mm leveä mikrohalkeama, joka on todennäköisesti seurausta ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta.
Lisäksi on noin 1,5 – 42 mm:n syvyydellä noin 14 kpl erisuuntaista <0,01 mm leveää ja <7 mm pitkää mikrohalkeamaa. Halkeamat ovat syntyneet mahdollisesti jo valmistuksen yhteydessä lämpötilaeroista aiheutuneiden jännitysten seurauksena tai kuivumiskutistuman ja ulkoisen mekaanisen rasituksen seurauksena. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

Näyte 13, pölkkö BP99, yläpinta, valmistusvuosi 2009, käyttämätön

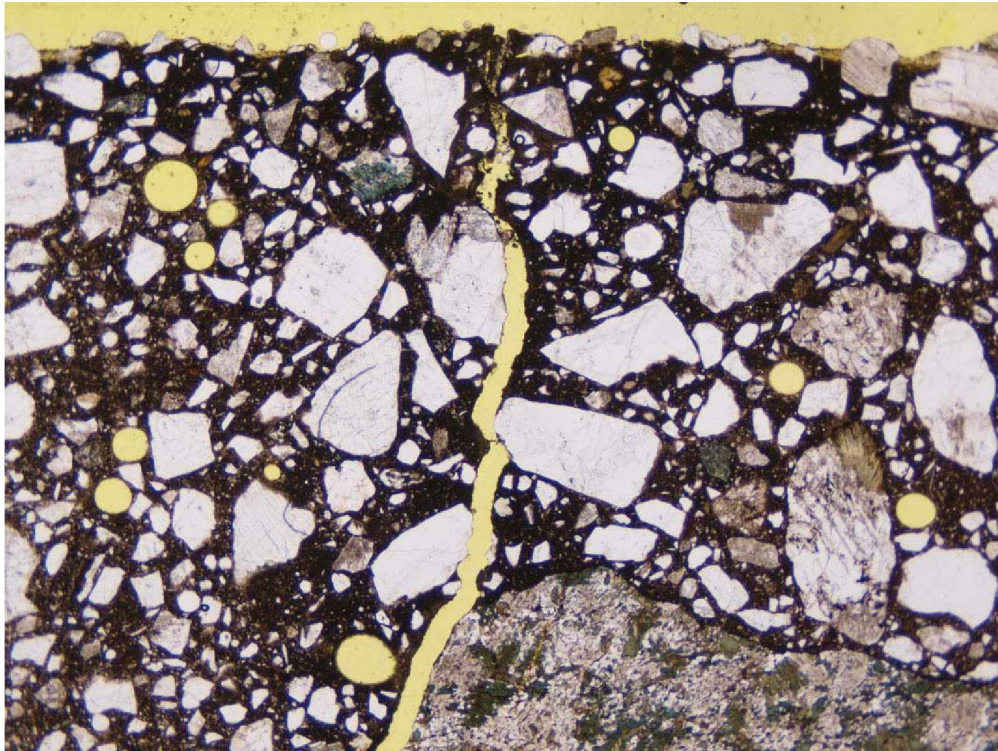
Näytteen pituus ohuthieessä on 68 – 72 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta laikukkaasti noin 0,1 – 6 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on harvakseltaan pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 2,2 mm), jotka edustavat epäonnistuneelta vaikuttavaa lisähuokostusta.
- Huokostiloissa ei ole täyttekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaiselta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti, gneissi, amfiboliitti ja oliviinidiabaasi. Sideaine-runkoainekontaktit ovat pääosin ehjiä.
- Betonissa on 0 – 5 mm:n syvyydessä 1 kpl yläpinnasta alkava ja ison kivirakeen ulkopintaa seuraava <0,01 mm leveä mikrohalkeama, joka on todennäköisesti seurausta ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta. Yläpinnan kohdassa, josta halkeama alkaa on 0,3 mm syvä ja 1 mm leveä syvennys. Heti syvennyksen alla halkeamassa on useita lyhyitä haarautumia. Muualla näytteen yläpinnassa on sileä sementtiliima. Pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua ei esiinny.

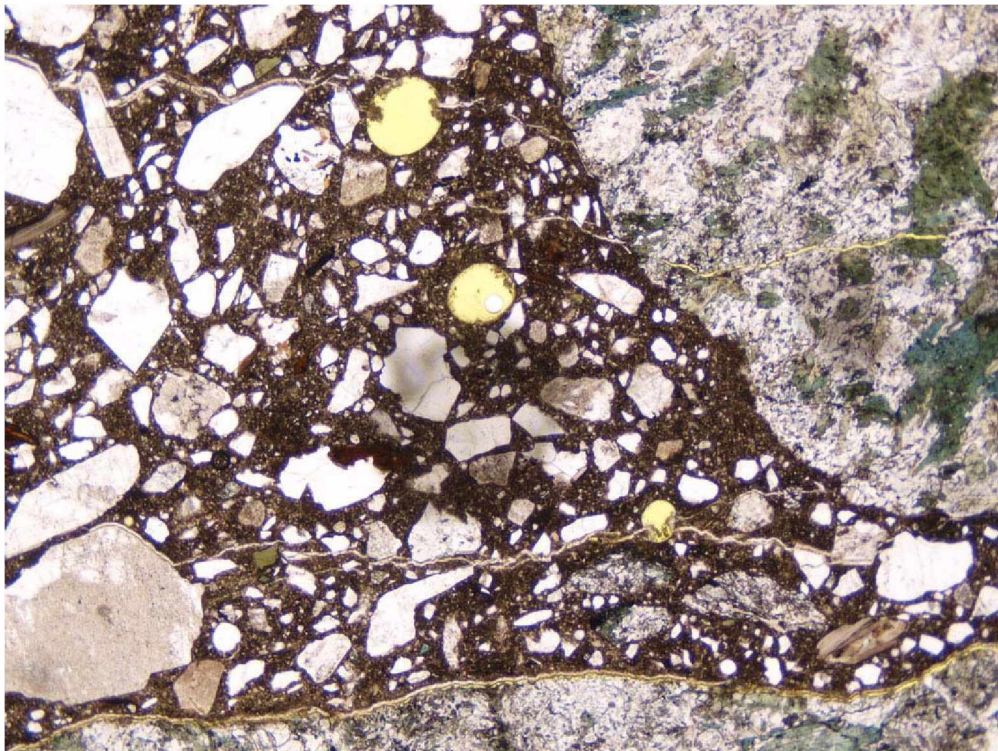
Näyte 14, pölkkö B97, yläpinta, valmistusvuosi 2009, käyttämätön

Näytteen pituus ohuthieessä on 73 – 74 mm (= ulottuvuus syvyys suunnassa). Ohuthienäyte ei ulotu läpi rakenteen.

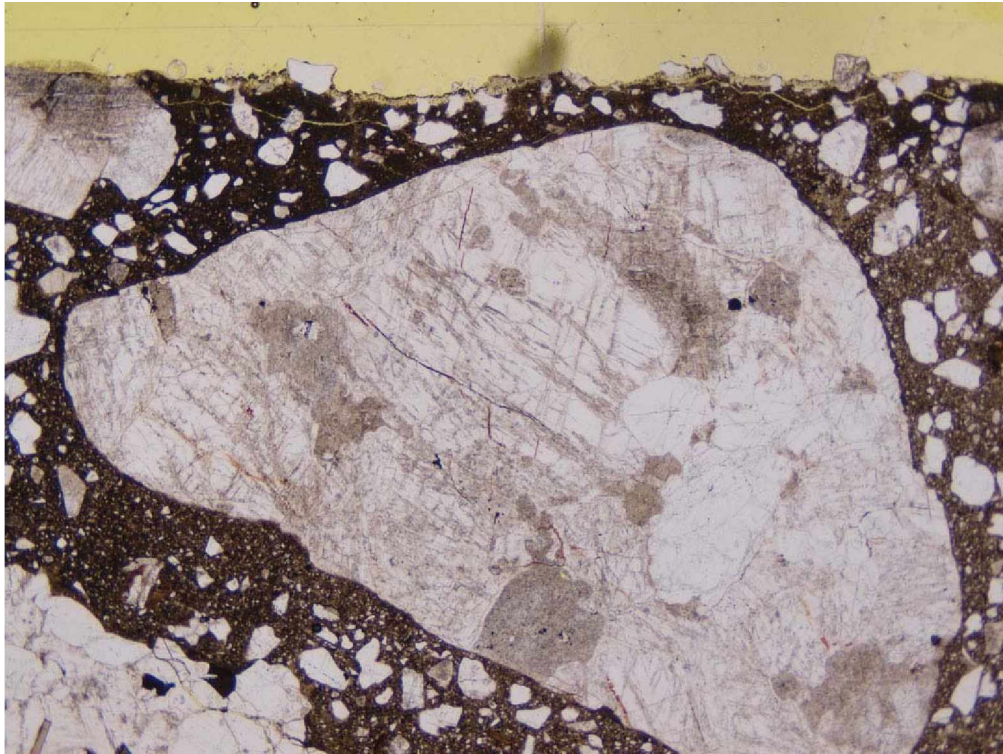
- Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 2 – 5 mm:n syvyyteen.
- Betonissa on vain muutamia pyöreitä huokosia (\varnothing 0,06 – 1,1 mm). Ei ole havaittavissa varsinaista lisähuokostusta, millä perusteella betonia ei voida luokitella pakkasenkestäväksi märissä olosuhteissa.
- Huokostiloissa ei ole täyttekiteytymiä.
- Vesi-sideainesuhde vaikuttaa tavanomaista alhaisemmalta ja hydrataatioaste tavanomaista korkeammalta.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa, jossa pääkivilajeina ovat graniitti ja amfiboliitti. Sideaine-runkoainekontaktit ovat ehjiä.
- Betonissa ei esiinny halkeilua.



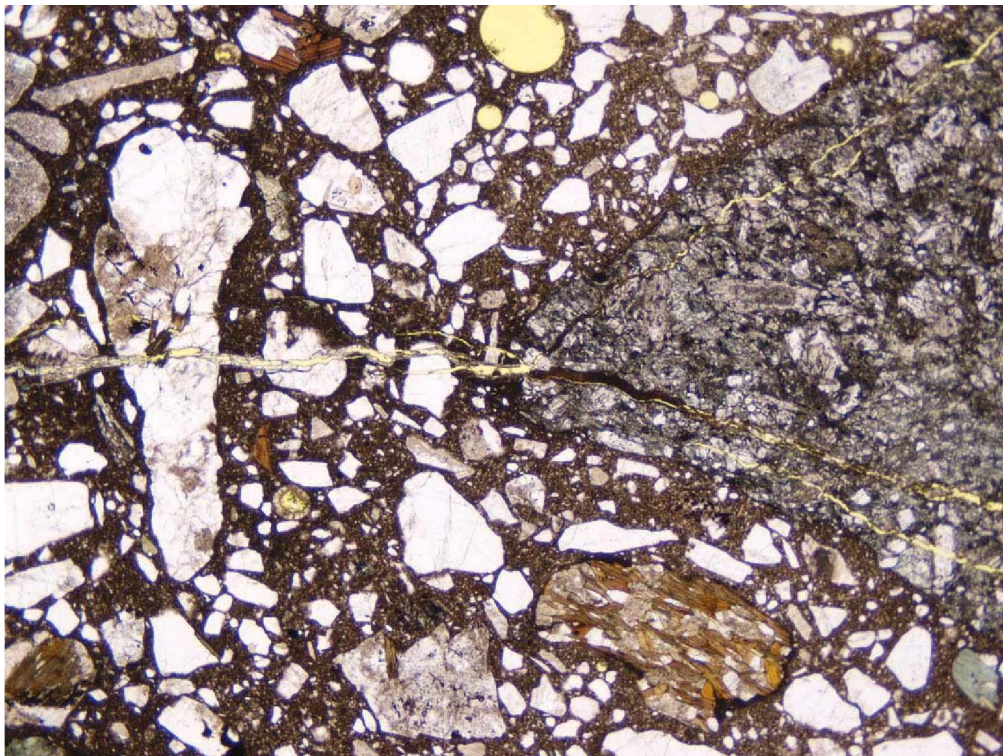
Näytteen V3 yläpinnassa oleva halkeama.
Kuva-ala on noin 5 mm x 7 mm.



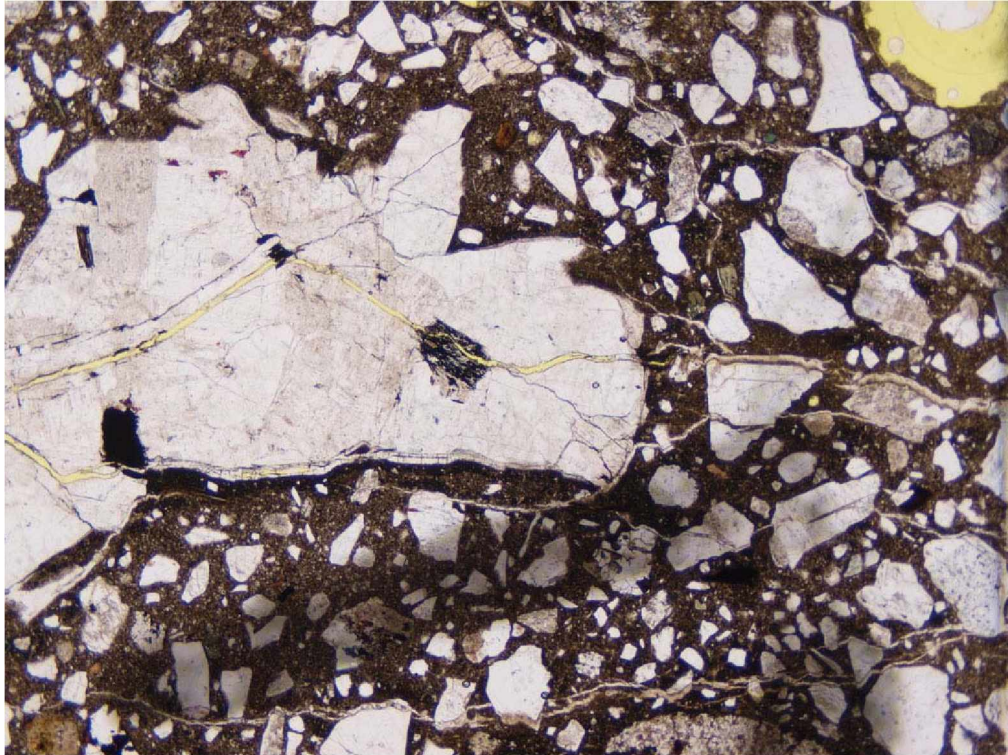
Näytteessä V4 olevia yläpinnan suuntaisia pakkasrapautumasta aiheutuneita mikrohalkeamia.
Huokosissa ja halkeamissa näkyy tummana täytekiteytymiä.
Kuva-ala on noin 5 mm x 7 mm.



*Näytteen V6 yläpinnan tuntumassa olevia mikrohalkeamia.
Kuva-ala on noin 5 mm x 7 mm.*



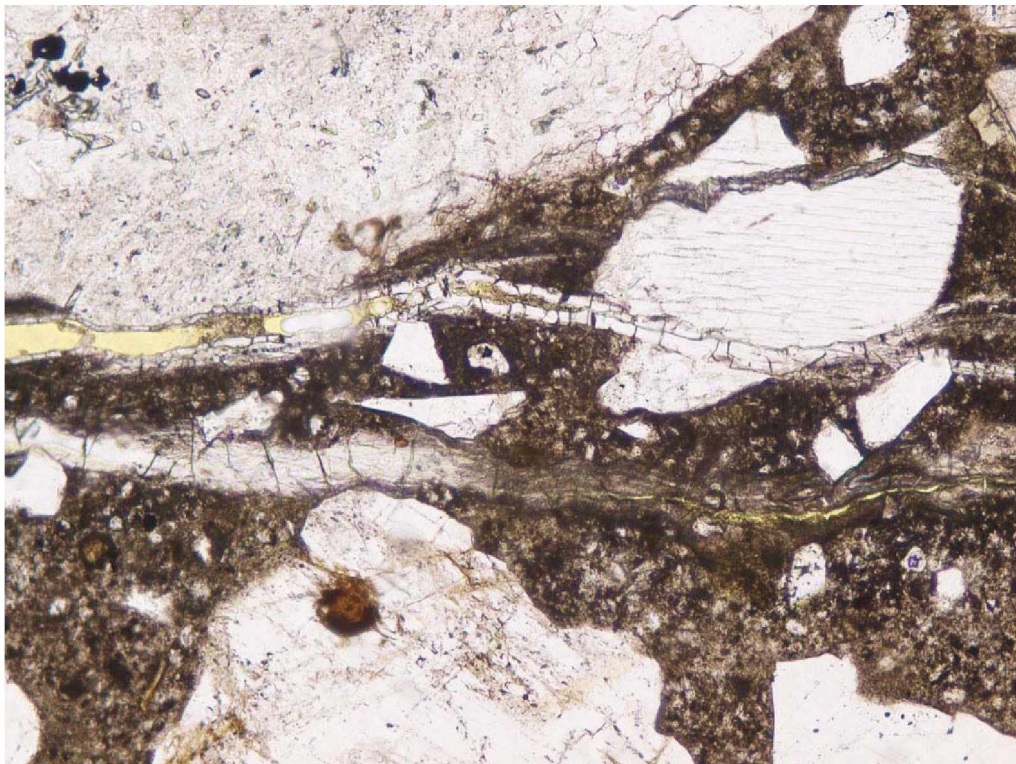
*Näytteessä V8 oleva ulkoisen mekaanisen rasituksen aiheuttama kivrakeita rikkova mikrohalkeama. Huokosissa näkyy tummana täyttekiteytymiä ja halkeamassa alkali-silikareaktiosta syntyneitä geelimäisiä reaktiotuotteita.
Kuva-ala on noin 5 mm x 7 mm.*



Näytteessä V14 olevia yläpinnan suuntaisia pakkasrapautumasta aiheutuneita mikrohalkeamia.

Oikean yläkulman huokosessa ja halkeamissa näkyy tummana täyte kiteytymiä.

Kuva-ala on noin 5 mm x 7 mm.



Näytteen V14 halkeamissa olevia alkali-silikareaktiosta syntyneitä geelimäisiä reaktiotuotteita.

Kuva-ala on noin 1,1 mm x 1,4 mm.

